DUNIA
PARALEL
MICHIO KAKU

DUNIA PARALEL

MICHIO KAKU

Buku ini diterbitkan dengan penuh kesungguhan, bukan kebetulan ada di hadapan Anda. Jika Anda menganggap buku ini mendatangi Anda dengan sendirinya, maka kami persilakan Anda membiarkan buku ini meninggalkan Anda dengan cara yang sama.

Dunia Paralel

Copyright © 2005 Michio Kaku

Diterjemahkan dari: ***Parallel Worlds***

karangan Michio Kaku

Doubleday

Penerjemah : Didieu Drogboy

Penyunting : Gorev Leben

Penyerasi : Raie Arches

Penata sampul : Lari Masamuda

Karya ini diterbitkan oleh:

Sainstory

Email : jsf.sainstory@gmail.com

Blog : sainstory.wordpress.com

Refray Library

Dunia Paralel

ID: Sainstory, Februari 2017

630 hlm; 15 x 22 cm

Penerjemahan : Februari-September 2010

Penyuntingan : Februari-September 2010

Publikasi : September 2010

Perbaikan : Februari 2017

Semua karya tercatat. Tak satupun bagian dari karya ini tertulis dengan sendirinya. Dilarang mempertanyakan atau mempersoalkan seluruh atau sebagiannya, *apakah karya ini muncul dengan sendirinya secara kebetulan*, dalam bentuk dan cara apapun tanpa yakin ditulis oleh penulis.

© **2008–2017 Overframe.** Refray Library adalah identitas milik Overframe di negeri anda saat ini.

Buku ini dipilih dengan maksud dan tujuan tertentu. Segala yang terjadi pada pemikiran dan kebijakan Anda akibat membaca buku ini, sepenuhnya bukan merupakan tanggungjawab kami. Tidak termasuk dalam maksud dan tujuan tertentu penerbitan buku ini adalah membuat Anda melalaikan kewajiban kepada Allah.

Wassalam,

Sainstory

Catatan: *penerbitan karya terjemahan ini bukan untuk mengambil keuntungan. Mohon perhatikan dan hormati.*

AYAH... KAKAK... MENGAPA MEROKOK?

Tembakau membunuh sekitar 6 juta orang setiap tahun, dimana lebih dari 5 juta orang yang meninggal merupakan perokok aktif, dan lebih dari 600.000 orang meninggal akibat menghirup asap rokok di sekitarnya. Hampir 80% dari 1 miliar jumlah perokok dunia hidup di negara-negara berpendapatan rendah dan menengah.

Sumber: WHO, Juli 2015

Buku ini aku persembahkan
untuk istriku tercinta, Shizue.

Daftar Isi

Penghargaan 16

Pengantar 20

Bagian 1 Alam Semesta 24

Bab 1 Gambaran Bayi Alam Semesta 25

Satelit WMAP 29

Umur Alam Semesta 36

Inflasi 39

Multiverse 41

Teori-M dan Dimensi Kesebelas 44

Akhir Alam Semesta 48

Melarikan Diri ke Hyperspace 50

Bab 2 Alam Semesta yang Paradoks 53

Paradoks Bentley 57

Paradoks Olbers 59

Einstein si Pemberontak 65

Paradoks Relativitas 66

Gaya Sebagai Penekukan Ruang 71

Kelahiran Kosmologi 74

Masa Depan Alam Semesta 80

Bab 3 Big Bang 87

Edwin Hubble, Astronom Ningrat 88

Efek Doppler dan Alam Semesta yang Mengembang 92

Hukum Hubble 94
Big Bang 95
George Gamow, Pelawak Kosmik 97
Dapur Nuklir Alam Semesta 101
Radiasi Gelombang Mikro Latar 103
Fred Hoyle, Sang Penentang 106
Teori Steady State 108
Kuliah BBC 109
Nukleosintesis Pada Bintang 111
Bukti Menentang Steady State 114
Bagaimana Bintang Terlahir 116
Tahi Burung dan Big Bang 120
Goncangan Personal Dari Big Bang 122
Omega dan Dark Matter 124
Satelit COBE 129
Bab 4 Inflasi dan Alam Semesta Paralel 131
Kelahiran Inflasi 134
Mencari Unifikasi 135
Unifikasi Saat Big Bang 138
False Vacuum 144
Persoalan Monokutub 145
Persoalan Keflatan 146
Persoalan Horison 148
Reaksi Terhadap Inflasi 150
Inflasi Balau dan Alam Semesta Paralel 154

Alam Semesta Dari Kenihilan 156
Seperti Apa Alam Semesta Lain Itu? 160
Kerusakan Kesimetrian 162
Kesimetrian dan Standard Model 163
Prediksi yang Bisa Diuji 167
Supernova—Kembalinya Lambda 169
Fase Alam Semesta 172
Masa Depan 175

Bagian 2 Multiverse 177

Bab 5 Portal Dimensi dan Perjalanan Waktu 178
Black Hole 182
Jembatan Einstein-Rosen 188
Black Hole yang Berotasi 192
Mengobservasi Black Hole 194
Penyembur Sinar Gamma 199
Mesin Waktu Van Stockum 202
Alam Semesta Gödel 204
Mesin Waktu Thorne 207
Persoalan Energi Negatif 210
Sebuah Alam Semesta di Kamar Tidur Anda 214
Mesin Waktu Gott 221
Paradoks Waktu 224
Bab 6 Alam Semesta Quantum Paralel 230
Twilight Zone 234
Monster Pemikir: John Wheeler 236

Determinisme atau Ketidakpastian? 241
Pepohonan di Hutan 246
Persoalan Kucing 248
Bom 253
Sum Over Path 256
Temannya Wigner 259
Dekoherensi 262
Many Worlds 263
It from Bit 269
Komputasi dan Teleportasi Quantum 270
Teleportasi Quantum 274
Fungsi Gelombang Alam Semesta 281
Bab 7 Teori-M: Induk Semua String 284
Teori-M 290
Sejarah Teori String 294
Sepuluh Dimensi 301
Kereta Musik String 306
Musik Kosmik 308
Persoalan Hyperspace 311
Mengapa String? 314
Supersimetri 318
Mendapatkan Standard Model 323
Teori-M 324
Misteri Supergravitasi 328
Dimensi Kesebelas 330

Dunia Bran 334
Dualitas 336
Lisa Randall 337
Alam Semesta yang Bertubrukan 345
Mini-Black Hole 352
Black Hole dan Paradoks Informasi 355
Alam Semesta Holografis 359
Apakah Alam Semesta Merupakan Program Komputer? 364
Tamat? 370
Bab 8 Alam Semesta Diciptakan? 375
Kebetulan Kosmik 383
Prinsip Antropik 385
Multiverse 387
Evolusi Alam Semesta 395
Bab 9 Mencari Gema Dari Dimensi Kesebelas 398
GPS dan Relativitas 399
Detektor Gelombang Gravitasi 400
Detektor Gelombang Gravitasi LIGO 402
Detektor Gelombang Gravitasi LISA 407
Lensa dan Cincin Einstein 408
Dark Matter di Ruang Tinggal Anda 413
Dark Matter (Supersimetris) SUSI 415
Sloan Sky Survey 416
Mengkompensasi Fluktuasi Termal 420
Mengikat Teleskop Radio Bersama-sama 423

Mengukur Dimensi Kesebelas 424
Large Hadron Collider 427
Akselerator Meja 433
Masa Depan 436

Bagian 3 Lari ke Hyperspace 439

Bab 10 Akhir Segalanya 440
Tiga Hukum Termodinamika 443
Big Crunch 446
Lima Tahap Alam Semesta 448
Bisakah Makhluk Berakal Bertahan? 458
Meninggalkan Alam Semesta 464
Bab 11 Lari Dari Alam Semesta 465
Peradaban Tipe I, II, dan III 469
Peradaban Tipe I 475
Peradaban Tipe II 479
Peradaban Tipe III 481
Peradaban Tipe IV 484
Klasifikasi Informasi 485
Tipe A Sampai Z 488
Langkah 1: Menciptakan dan Menguji Theory of Everything .. 491
Langkah 2: Menemukan Wormhole dan White Hole Alami 493
Langkah 3: Mengirim Satelit Melewati Black Hole 494
Langkah 4: Mengkonstruksi Black Hole Secara Bertahap 496
Langkah 5: Menciptakan Bayi Alam Semesta 499
Langkah 6: Menciptakan Atom Smasher Raksasa 503

Langkah 7: Menciptakan Mekanisme Implosi 507
Langkah 8: Membangun Mesin Warp Drive 510
Langkah 9: Menggunakan Energi Negatif Dari Kondisi Terperas .. 513
Langkah 10: Menanti Transisi Quantum 515
Langkah 11: Harapan Terakhir 517
Bab 12 Di Luar Multiverse 523
Perspektif Sejarah 526
Prinsip Copernican vs. Prinsip Antropik 528
Makna Quantum 532
Makna Dalam Multiverse 535
Apa yang Dipikirkan Fisikawan Tentang Makna Alam Semesta 539
Menciptakan Makna Kita Sendiri 546
Transisi Menuju Peradaban Tipe I 548
Catatan 552
Glosarium 588
Bacaan yang Direkomendasikan 625

Penghargaan

Saya ucapkan terima kasih kepada semua ilmuwan berikut yang telah bersedia meluangkan waktu untuk diwawancarai. Komentar, pandangan, dan ide mereka sangat memperkaya buku ini serta menambah kedalaman dan fokusnya:

- Steven Weinberg, peraih Nobel, Universitas Texas di Austin
- Murray Gell-Mann, peraih Nobel, Institut Santa Fe dan Institut Teknologi California
- Leon Lederman, peraih Nobel, Illinois Institute of Technology
- (Purn.) Joseph Rotblat, peraih Nobel, St. Bartholomew's Hospital
- Walter Gilbert, peraih Nobel, Universitas Harvard
- (Alm.) Henry Kendall, peraih Nobel, Massachusetts Institute of Technology
- Alan Guth, fisikawan, Massachusetts Institute of Technology
- Sir Martin Rees, astronom Royal of Great Britain, Universitas Cambridge
- Freeman Dyson, fisikawan, Institute for Advanced Study, Universitas Princeton
- John Schwarz, fisikawan, Institut Teknologi California
- Lisa Randall, fisikawan, Universitas Harvard
- J. Richard Gott III, fisikawan, Universitas Princeton
- Neil de Grasse Tyson, astronom, Universitas Princeton dan

Hayden Planetarium

- Paul Davies, fisikawan, Universitas Adelaide
- Ken Croswell, astronom, Universitas California, Berkeley
- Don Goldsmith, astronom, Universitas California, Berkeley
- Brian Greene, fisikawan, Universitas Columbia
- Cumrun Vafa, fisikawan, Universitas Harvard
- Stuart Samuel, fisikawan, Universitas California, Berkeley
- (Alm.) Carl Sagan, astronom, Universitas Cornell
- Daniel Greenberger, fisikawan, City College of New York
- V.P. Nair, fisikawan, City College of New York
- Robert P. Kirshner, astronom, Universitas Harvard
- Peter D. Ward, geolog, Universitas Washington
- John Barrow, astronom, Universitas Sussex
- Marcia Bartusiak, jurnalis sains, Massachusetts Institute of Technology
- John Casti, fisikawan, Institut Santa Fe
- Timothy Ferris, jurnalis sains
- Michael Lemonick, penulis sains, majalah *Time*
- Fulvio Melia, astronom, Universitas Arizona
- John Horgan, jurnalis sains
- Richard Muller, fisikawan, Universitas California, Berkeley
- Lawrence Krauss, fisikawan, Universitas Case Western Reserve
- Ted Taylor, perancang bom atom
- Philip Morrison, fisikawan, Massachusetts Institute of Technology

- Hans Moravec, ilmuwan komputer, Universitas Carnegie Mellon
- Rodney Brooks, ilmuwan komputer, Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology
- Donna Shirley, astrofisikawan, Jet Propulsion Laboratory
- Dan Wertheimer, astronom, SETI@home, Universitas California, Berkeley
- Paul Hoffman, jurnalis sains, majalah *Discover*
- Francis Everitt, fisikawan, Gravity Probe B, Universitas Stanford
- Sidney Perkowitz, fisikawan, Universitas Emory

Saya juga mengucapkan terima kasih kepada semua ilmuwan berikut atas diskusi fisika menggairahkan selama bertahun-tahun yang telah sangat membantu mempertajam kandungan buku ini:

- T. D. Lee, peraih Nobel, Universitas Columbia
- Sheldon Glashow, peraih Nobel, Universitas Harvard
- (Alm.) Richard Feynman, peraih Nobel, California Institute of Technology
- Edward Witten, fisikawan, Institute for Advanced Study, Universitas Princeton
- Joseph Lykken, fisikawan, Fermilab
- David Gross, fisikawan, Institut Kavli, Santa Barbara
- Frank Wilczek, fisikawan, Universitas California, Santa Barbara
- Paul Townsend, fisikawan, Universitas Cambridge
- Peter Van Nieuwenhuizen, fisikawan, State University of New York, Stony Brook
- Miguel Virasoro, fisikawan, Universitas Rome

- (Alm.) Bunji Sakita, fisikawan, City College of New York
- Ashok Das, fisikawan, Universitas Rochester
- (Alm.) Robert Marshak, fisikawan, City College of New York
- Frank Tipler, fisikawan, Universitas Tulane
- Edward Tryon, fisikawan, Hunter College
- Mitchell Begelman, astronom, Universitas Colorado

Saya ucapkan terima kasih kepada Ken Croswell atas berbagai komentar terhadap buku ini.

Saya juga menyampaikan terima kasih kepada editor saya, Roger Scholl, yang telah menyunting dua buku saya dengan baik. Tangannya telah ikut meningkatkan mutu buku-buku saya, dan komentarnya selalu membantu memperjelas dan memperdalam kandungan dan penyajian buku-buku saya. Terakhir, saya ucapkan terima kasih kepada agen saya, Stuart Krichevsky, yang telah mempublikasikan buku-buku saya selama tahun-tahun ini.

Pengantar

Kosmologi adalah studi alam semesta secara keseluruhan, meliputi kelahirannya dan barangkali nasib akhirnya. Tak heran, kosmologi telah mengalami banyak transformasi dalam evolusi lambatnya yang menyakitkan, evolusi yang seringkali dikalahkan oleh dogma relijius dan takhayul.

Revolusi pertama dalam kosmologi diantarkan oleh pengenalan teleskop pada tahun 1600-an. Dengan bantuan teleskop, Galileo Galilei, yang memperluas karya astronom besar Nicolaus Copernicus dan Johannes Kepler, mampu membuka kemegahan langit untuk pertama kalinya bagi penyelidikan ilmiah mendalam. Kemajuan tahap pertama kosmologi ini memuncak dalam karya Isaac Newton, yang pada akhirnya menetapkan hukum fundamental yang mengatur gerakan benda-benda angkasa. Sebagai pengganti sihir dan mistik, hukum benda angkasa kini dipandang sebagai subjek yang dapat dihitung dan dikembangbiakkan.

Revolusi kedua dalam kosmologi dimulai dengan pengenalan teleskop besar pada abad ke-20, seperti teleskop di Mount Wilson dengan cermin reflektor besar 100 inchi. Pada tahun 1920-an, astronom Edwin Hubble memakai teleskop raksasa ini untuk menggulingkan dogma berabad-abad (yang menyatakan alam semesta statis dan kekal) dengan menunjukkan galaksi-galaksi di alam semesta bergerak menjauhi Bumi dengan kecepatan luar biasa—bahwa alam

semesta mengembang/meluas. Ini memperkuat teori relativitas umum Einstein yang menyatakan arsitektur ruang-waktu bersifat dinamis dan melengkung, bukan flat dan linier. Ini menjadi penjelasan masuk akal pertama mengenai awal-mula alam semesta, bahwa alam semesta berawal dengan ledakan raksasa yang disebut "*big bang*", yang membuat bintang-bintang dan galaksi-galaksi terlempar ke luar di angkasa raya. Dengan penelitian rintisan George Gamow dan rekan-rekannya terhadap teori *big bang* dan Fred Hoyle mengenai asal-usul unsur, muncullah penopang yang memberikan uraian luas evolusi alam semesta.

Revolusi ketiga sedang berlangsung. Ia baru berusia sekitar lima tahun. Ia dimulai oleh sederetan instrumen baru berteknologi tinggi seperti satelit antariksa, laser, detektor gelombang gravitasi, teleskop sinar-X, dan superkomputer berkecepatan tinggi. Sekarang kita memiliki data terandal mengenai sifat alam semesta, meliputi umurnya, komposisinya, dan bahkan mungkin masa depan dan ajalnya.

Para astronom kini sadar, alam semesta mengembang dengan mode tak terkendali, berakselerasi tanpa batas, menjadi semakin dingin seiring waktu. Jika ini terus berlanjut, kita akan menghadapi "*big freeze*", di mana alam semesta akan diliputi kegelapan dan dingin, dan semua makhluk berakal akan musnah.

Buku ini membahas revolusi besar ketiga ini. Ini berbeda dari buku fisika saya sebelumnya, *Beyond Einstein* dan *Hyperspace*, yang membantu memperkenalkan konsep baru berupa dimensi tinggi dan teori superstring kepada masyarakat. Dalam *Dunia Paralel* ini, saya

fokus pada perkembangan revolusioner—bukan pada ruang-waktu—dalam kosmologi selama beberapa tahun terakhir, berdasarkan bukti baru dari laboratorium-laboratorium dunia serta pencapaian angkasa terluar, dan terobosan baru dalam teori fisika. Tujuan saya adalah agar buku ini dapat dibaca dan dipahami tanpa pengenalan fisika atau kosmologi terlebih dahulu.

Di bagian 1 buku ini saya fokus pada studi alam semesta, menyimpulkan kemajuan yang telah dicapai dalam tahap-tahap awal kosmologi, yang memuncak dalam teori bernama "inflasi", yang memberi kita rumusan paling mutakhir sampai mengusangkan teori *big bang*. Di bagian 2, saya khusus fokus pada teori multiverse—dunia yang tersusun dari banyak alam semesta, di mana alam semesta kita adalah salah satunya—dan membahas kemungkinan *wormhole*, lengkungan ruang dan waktu, dan bagaimana dimensi-dimensi tinggi menghubungkan mereka. Teori superstring dan teori-M telah menjadi langkah awal dan pokok kita melampaui teori Einstein; kedua teori ini memberi bukti lebih jauh bahwa alam semesta kita kemungkinan hanyalah salah satu dari banyak alam semesta. Terakhir, di bagian 3, saya membahas *big freeze* dan apa yang kini dipandang oleh ilmuwan sebagai akhir alam semesta kita. Saya juga menyajikan bahasan mendalam, tapi spekulatif, tentang kemungkinan bagaimana suatu peradaban maju di masa depan menggunakan hukum fisika untuk meninggalkan alam semesta kita triliunan tahun dari sekarang dan kemudian memasuki alam semesta lain yang lebih ramah untuk memulai proses kelahiran kembali, atau pergi ke masa lampau ketika

temperatur alam semesta lebih hangat.

Dengan banjir data baru yang diperoleh hari ini, dengan alat-alat baru semisal satelit antariksa yang mampu memindai angkasa raya, dengan detektor gelombang gravitasi baru, dan dengan generasi baru pemecah atom (*atom smasher*) seukuran kota yang hampir sempurna, para fisikawan merasa kita sedang memasuki apa yang boleh disebut abad emas kosmologi. Singkatnya, ini adalah masa terhebat untuk menjadi fisikawan dan penjelajah dalam penyelidikan memahami asal-usul kita dan nasib alam semesta.

BAGIAN 1
Alam Semesta

Bab 1
Gambaran Bayi Alam Semesta

> Penyair hanya meminta agar kepalanya memasuki langit. Sedangkan pemikir berusaha agar langit masuk ke dalam kepalanya. Dan pecahlah kepalanya.
>
> —G.K. Chesterson

Saat kanak-kanak, saya punya konflik pribadi menyangkut keyakinan saya. Orangtua saya dibesarkan dalam tradisi Buddha. Namun saya menghadiri sekolah Minggu setiap pekan, di mana saya senang mendengar kisah-kisah alkitab mengenai ikan paus, bahtera, pilar garam, gading, dan apel. Saya terpesona oleh cerita-cerita perumpamaan Perjanjian Lama ini, yang menjadi bagian favorit saya di sekolah Minggu. Bagi saya cerita banjir besar, semak panas, dan air perpisahan jauh lebih mengasyikkan daripada nyanyian dan meditasi Buddhis. Kisah-kisah heroisme dan tragedi kuno ini menggambarkan secara jelas pelajaran moral dan etika yang dalam yang telah menyertai saya sepanjang hidup.

Suatu hari di sekolah Minggu, kami mempelajari Kejadian. Kisah Tuhan berkata keras dari surga, "Jadilah Cahaya!", terdengar jauh lebih dramatis dibanding meditasi Nirwana dalam sunyi. Dengan polos saya bertanya kepada guru sekolah Minggu, "Apakah Tuhan punya

ibu?" Biasanya dia memberikan jawaban yang tajam dan pelajaran moral yang dalam. Namun kali ini dia tercengang. "Tidak," jawabnya ragu-ragu, "mungkin Tuhan tidak punya ibu." "Lalu dari mana Tuhan berasal?" tanya saya. Dia mengomel bahwa dirinya harus berkonsultasi dulu dengan pendeta terkait pertanyaan itu.

Saya tidak sadar, tanpa sengaja saya telah tersandung dengan salah satu pertanyaan besar agama. Saya bingung, karena dalam Buddha, tak ada Tuhan sama sekali, yang ada cuma alam semesta abadi, tanpa awal dan tanpa akhir. Kemudian, saat mulai mempelajari mitologi-mitologi besar dunia, saya jadi tahu ada dua jenis kosmologi dalam agama, pertama, berdasarkan momen tunggal ketika Tuhan menciptakan alam semesta, kedua, berdasarkan ide bahwa alam semesta senantiasa ada dan akan senantiasa ada.

Saya berpikir, tidak mungkin dua-duanya benar.

Lalu saya mulai mendapati ternyata tema umum ini melintasi banyak kebudayaan. Contohnya, menurut mitologi China, di permulaan masa terdapat sebuah telur kosmik. Dewa P'an Ku yang masih bayi tinggal hampir selama-lamanya di dalam telur tersebut, yang mengapung di atas laut Chaos tak berbentuk. Begitu telur itu akhirnya menetas, P'an Ku tumbuh sangat cepat, lebih dari 10 kaki per hari, hingga bagian atas cangkang telur menjadi langit dan bagian bawah menjadi bumi. Setelah 18.000 tahun, dia mati untuk melahirkan dunia kita: darahnya menjadi sungai, matanya menjadi matahari dan bulan, dan suaranya menjadi guntur.

Sedikit-banyak, mitos P'an Ku mencerminkan satu tema yang

ditemukan dI banyak agama dan mitologi kuno, bahwa alam semesta menjadi ada secara *creatio ex nihilo* (diciptakan dari ketiadaan). Menurut mitologi Yunani, alam semesta berawal dalam keadaan Chaos (sebenarnya kata "*chaos*" berasal dari bahasa Yunani yang berarti "jurang sangat dalam"). Kehampaan tak berbentuk ini sering dilukiskan sebagai sebuah lautan, sebagaimana dalam mitologi Babilonia dan Jepang. Tema ini dijumpai dalam mitologi Mesir kuno, di mana dewa matahari, Ra, muncul dari sebuah telur yang mengapung. Dalam mitologi Polinesia, telur kosmik diganti dengan batok kepala. Suku Maya meyakini variasi lain dari kisah ini, yaitu alam semesta terlahir tapi akhirnya mati setelah 5.000 tahun, hanya untuk dihidupkan lagi dan lagi demi mengulang siklus kelahiran dan kehancuran tanpa akhir.

Mitos *creatio ex nihilo* ini berlawanan dengan kosmologi Buddha dan tradisi khas Hindu. Menurut mitologi keduanya, alam semesta itu tidak berwaktu, tanpa awal ataupun akhir. Ada banyak level eksistensi, tapi yang tertinggi adalah Nirwana, yang abadi dan hanya bisa diraih dengan meditasi termurni. Dalam *Mahapurana* Hindu, tertulis demikian, "Seandainya Tuhan menciptakan dunia, lalu di mana Dia berada sebelum Penciptaan?..... Ketahuilah bahwa dunia tidak diciptakan, sebagaimana waktu itu sendiri, tak berawal dan tak berakhir."

Mitologi-mitologi ini saling bertentangan, tanpa ada pemecahan di antara mereka. Mereka saling terpisah: alam semesta yang berawal atau yang tidak berawal. Sepertinya tidak ada daerah tengah.

Namun hari ini sebuah pemecahan tampaknya sedang muncul dari arah yang sama sekali baru—dunia sains—sebagai hasil dari instrumen ilmiah canggih generasi baru yang membumbung tinggi di angkasa luar. Mitologi kuno bersandar pada pengetahuan penyampai kisah untuk menjelaskan awal-mula dunia kita. Hari ini, para ilmuwan melepaskan sederet satelit antariksa, laser, detektor gelombang gravitasi, interferometer, superkomputer berkecepatan tinggi, dan Internet, dalam proses merevolusi pemahaman kita tentang alam semesta, dan juga memberi kita penjelasan paling meyakinkan tentang penciptaannya.

Hal yang secara bertahap sedang muncul dari data tersebut adalah perpaduan besar dua mitologi berlawanan tadi. Para ilmuwan berspekulasi, mungkin saja Genesis terjadi berulang-ulang di laut Nirwana yang abadi. Dalam gambaran baru ini, alam semesta kita dapat disamakan dengan sebuah gelembung yang mengapung di "laut" yang jauh lebih besar, bersama gelembung-gelembung baru yang terbentuk terus-menerus. Menurut teori ini, alam semesta, seperti gelembung-gelembung yang terbentuk di air mendidih, terus-menerus tercipta, mengapung di arena yang jauh lebih besar, Nirwana *hyperspace* sebelas-dimensi. Semakin banyak ilmuwan yang meng-isyaratkan alam semesta kita memang timbul dari bencana berapi-api, *big bang*, selain bahwa ia juga hidup bersama di laut abadi berisi alam-alam semesta lain. Jika benar, mungkin *big bang* sedang berlangsung saat ini, saat Anda membaca kalimat ini.

Para fisikawan dan astronom di seluruh dunia sedang berspekulasi

seperti apa dunia-dunia paralel ini, apa hukum yang mereka patuhi, bagaimana mereka lahir, dan bagaimana mereka akhirnya akan mati. Mungkin dunia-dunia paralel ini tandus, tidak memiliki bahan dasar kehidupan. Atau mungkin mereka mirip alam semesta kita, dipisahkan oleh sebuah peristiwa quantum yang membuat alam-alam semesta tersebut berdivergensi dari alam semesta kita. Dan segelintir fisikawan berspekulasi, barangkali suatu hari nanti, jika kehidupan di alam semesta kita tak dapat dipertahankan karena ia menua dan mendingin, kita terpaksa meninggalkannya dan lari ke alam semesta lain.

Mesin penggerak teori-teori baru ini adalah banjir data yang mengalir dari satelit-satelit antariksa kita selagi mereka memotret puing penciptaan itu sendiri. Yang mengagumkan, para ilmuwan sedang fokus pada apa yang terjadi 380.000 tahun pasca *big bang*, ketika "*afterglow*"[1] penciptaan pertama kali memenuhi alam semesta. Barangkali gambaran paling meyakinkan akan radiasi penciptaan ini berasal dari sebuah instrumen baru bernama satelit WMAP.

Satelit WMAP

"Luar biasa!" "Menakjubkan!" adalah sebagian dari kata-kata yang keluar di bulan Februari 2003 dari mulut astrofisikawan, yang biasanya tak banyak bicara, sewaktu mereka melukiskan data akurat yang dipanen dari satelit terbaru. WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), namanya diambil dari kosmolog perintis David

[1] Pijaran yang tinggal setelah sumbernya menghilang—penj.

Wilkinson dan diluncurkan tahun 2001, telah memberikan gambaran detil alam semesta awal saat baru berumur 380.000 tahun, dengan presisi tak tertandingi. Energi kolosal sisa dari bola api permulaan yang melahirkan bintang-bintang dan galaksi-galaksi telah dan terus tersebar di alam semesta kita selama miliaran tahun. Hari ini, energi itu akhirnya terekam sangat detil dalam film oleh satelit WMAP, menghasilkan peta yang tak pernah disaksikan sebelumnya, sebuah foto angkasa yang memperlihatkan secara detil radiasi gelombang mikro hasil *big bang* itu sendiri, yang oleh majalah *Time* disebut "*echo of creation*" (gema penciptaan). Para astronom takkan pernah lagi memandang langit dengan cara yang dulu.

Temuan-temuan satelit WMAP melambangkan "upacara perjalanan kosmologi dari spekulasi menuju sains akurat," ujar John Bahcall dari Institute for Advanced Study di Princeton. Untuk pertama kalinya banjir data periode awal sejarah alam semesta ini memungkinkan para kosmolog menjawab secara akurat semua pertanyaan tertua, pertanyaan-pertanyaan yang telah membingungkan dan membangkitkan keingintahuan manusia sejak kita pertama kali memandang keindahan samawi langit malam yang menyala-nyala. Berapa umur alam semesta? Dari apa ia terbuat? Apa takdir alam semesta?

(Pada tahun 1992, sebuah satelit terdahulu, COBE [Cosmic Background Explorer Satellite], memberi kita gambaran kabur pertama mengenai radiasi latar yang memenuhi alam semesta. Walaupun sangat revolusioner, hasil ini juga mengecewakan karena hanya memberi gambaran alam semesta awal yang tidak jelas. Hal

tersebut tidak menghalangi pers untuk menjuluki foto ini sebagai "wajah Tuhan". Tapi deskripsi lebih akurat atas gambaran kabur dari COBE ini adalah mereka merepresentasikan "gambaran bayi" alam semesta muda. Seandainya alam semesta hari ini adalah pria 80 tahun, maka gambar-gambar COBE dan WMAP memperlihatkannya sebagai bayi baru lahir, yang berusia kurang dari satu hari.)

Alasan mengapa satelit WMAP dapat memberikan gambaran baru bayi alam semesta adalah karena langit malam itu seperti mesin waktu. Lantaran cahaya melaju dengan kecepatan terbatas, maka bintang-bintang yang kita lihat di malam hari berada dalam keadaannya yang dahulu, bukan hari ini. Butuh lebih dari satu detik bagi cahaya dari Bulan untuk menggapai Bumi. Jadi ketika memandang Bulan, sebetulnya kita sedang memandang keadaan Bulan satu detik sebelumnya. Butuh delapan menit bagi cahaya Matahari untuk menggapai Bumi. Demikian pula banyak bintang familiar lain yang kita saksikan di angkasa yang jaraknya begitu jauh sehingga cahaya mereka butuh waktu 10 sampai 100 tahun untuk mencapai mata kita. (Dengan kata lain, mereka berada pada 10 sampai 100 tahun-cahaya dari Bumi. Satu tahun-cahaya kira-kira sama dengan 6 triliun mil, atau jarak yang ditempuh cahaya dalam satu tahun.) Cahaya dari galaksi-galaksi jauh mungkin bisa ratusan juta hingga miliaran tahun-cahaya jauhnya. Jadi, mereka merupakan cahaya "fosil", sesuatu yang telah dipancarkan bahkan sebelum kemunculan dinosarus. Beberapa objek terjauh yang bisa kita lihat dengan teleskop disebut quasar, mesin galaktik raksasa yang menghasilkan jumlah

energi luar biasa di dekat tepi *visible universe* (alam semesta tampak), yang bisa berjarak 12 hingga 13 miliar tahun-cahaya dari Bumi. Dan sekarang, satelit WMAP telah mendeteksi radiasi yang dipancarkan bahkan sebelum masa tersebut, dari bola api permulaan yang menghasilkan alam semesta.

Untuk melukiskan alam semesta, terkadang para kosmolog mencontohkan dengan memandang ke bawah dari puncak Empire State Building, yang tingginya lebih dari seratus lantai di atas Manhattan. Saat memandang ke bawah dari puncak gedung tersebut, Anda hampir tidak bisa melihat permukaan jalan raya. Jika dasar Empire State Building melambangkan *big bang*, maka, dengan memandang ke bawah dari puncaknya, galaksi-galaksi jauh terletak di lantai sepuluh. Quasar-quasar jauh yang terlihat oleh teleskop Bumi terletak di lantai tujuh. Latar kosmik yang diukur oleh satelit WMAP terletak hanya setengah inchi di atas jalan raya. Dan kini satelit WMAP memberi kita ukuran akurat umur alam semesta hingga akurasi 1 persen yang menakjubkan: 13,7 miliar tahun.

Misi WMAP merupakan puncak kerja keras para astrofisikawan selama lebih dari satu dekade. Konsep satelit WMAP pertama kali diajukan ke NASA pada tahun 1995, dua tahun kemudian disetujui. Pada 30 Juni 2001, NASA mengirim satelit WMAP di atas roket Delta II ke orbit surya dan bertengger di antara Bumi dan Matahari. Tujuannya, yang telah ditetapkan secara teliti, adalah Lagrange Point 2 (atau L2, titik khusus stabilitas relatif di dekat Bumi). Dari titik menguntungkan ini, satelit tersebut selalu menunjuk jauh dari

Matahari, Bumi, dan Bulan dan karenanya memiliki penglihatan terhadap alam semesta tanpa terhalangi sama sekali. Ia betul-betul memindai seluruh angkasa setiap enam bulan.

Peralatannya canggih. Dengan sensor kuatnya, ia mampu mendeteksi radiasi gelombang mikro lemah sisa *big bang* yang meliputi alam semesta, namun sebagian besar diserap oleh atmosfer kita. Satelit berbahan aluminium itu berukuran 3,8 meter kali 5 meter (sekitar 11,4 kaki kali 15 kaki) dan berbobot 840 kilogram (1.850 pon). Ia memiliki dua teleskop *back-to-back* (saling membelakangi) yang memfokuskan radiasi gelombang mikro dari angkasa di sekelilingnya, dan kemudian mengirimkan data tersebut ke Bumi. Ia hanya ditenagai oleh listrik 419 watt (tenaga lima bohlam biasa). Mengangkasa sejutaan mil dari Bumi, satelit WMAP berada jauh dari gangguan atmosfer Bumi yang dapat menutupi gelombang mikro latar lemah, dan ia mampu membaca seluruh angkasa terus-menerus.

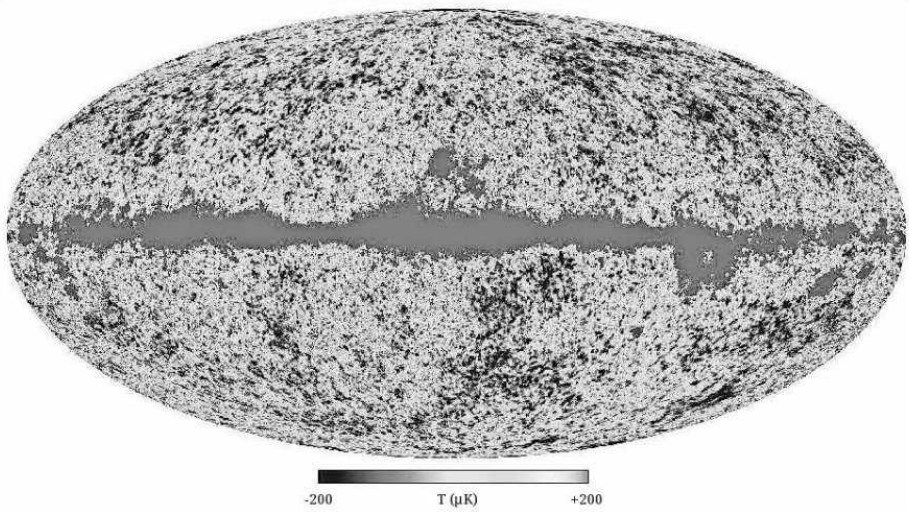
Satelit tersebut menyelesaikan observasi angkasa penuh pertamanya pada April 2002. Enam bulan kemudian, observasi angkasa kedua dilakukan. Hari ini, satelit WMAP telah memberi kita peta radiasi paling detil dan komprehensif. Radiasi gelombang mikro latar yang terdeteksi oleh WMAP pertama kali diprediksi oleh George Gamow dan kelompoknya pada tahun 1948, yang juga mencatat bahwa radiasi ini memiliki temperatur. WMAP mengukur temperaturnya tepat di atas nol absolut, atau antara 2,7249 sampai 2,7251 derajat Kelvin.

Dalam penglihatan mata biasa, peta angkasa WMAP terlihat tidak menarik; ia hanya kumpulan bintik acak. Namun, kumpulan bintik-

bintik ini membuat sebagian astronom mencucurkan air mata, karena mereka melambangkan fluktuasi atau ketidakteraturan dalam bencana berapi permulaan, *big bang*, sesaat setelah alam semesta tercipta. Fluktuasi kecil ini seperti "benih", yang sejak saat itu mengembang sangat besar seiring alam semesta meledak keluar. Hari ini, benih-benih kecil ini telah tumbuh menjadi galaksi-galaksi dan gugus-gugus galaksi yang kita saksikan menerangi angkasa. Dengan kata lain, galaksi Bima Sakti kita beserta semua gugus galaksi yang berada di sekitar kita dahulunya merupakan salah satu dari fluktuasi ini. Dengan mengukur persebaran fluktuasi-fluktuasi ini, kita dapat mengetahui awal-mula gugus galaksi, seperti bintik-bintik yang terlukis pada permadani kosmik yang meliputi langit malam.

Hari ini, volume data astronomis melebihi teori-teori para ilmuwan. Singkatnya, saya ingin menunjukkan kita sedang memasuki abad emas kosmologi. (Betapapun satelit WMAP sangat impresif, kemungkinan besar ia akan dikerdilkan oleh satelit Planck yang rencananya diluncurkan oleh Eropa pada tahun 2007; Planck akan memberi astronom gambaran radiasi gelombang mikro latar yang lebih detil.) Hari ini kosmologi akhirnya cukup umur, muncul dari bayang-bayang sains setelah merana selama bertahun-tahun dalam rawa spekulasi dan dugaan liar. Secara historis, para kosmolog sudah lama menyandang reputasi kurang baik. Hasrat mereka dalam mengajukan teori-teori megah mengenai alam semesta hanya diimbangi dengan sedikit data. Sebagaimana sering dikatakan oleh peraih Nobel, Lev Landau, "Para kosmolog sering keliru namun tak pernah ragu." Ada

sebuah adagium tua dalam sains: "Jika ada spekulasi, maka akan lahir semakin banyak spekulasi, dan kemudian akan ada kosmologi."



Gambar 1: Ini adalah "gambar bayi" alam semesta, saat baru berumur 380.000 tahun, yang diambil oleh satelit WMAP. Setiap bintik kemungkinan besar melambangkan fluktuasi quantum kecil dalam *afterglow* penciptaan yang mengembang menghasilkan galaksi dan gugus galaksi yang kita saksikan hari ini.

Sebagai mahasiswa Harvard jurusan fisika di akhir 1960-an, saya sedikit bermain dengan studi kosmologi. Sejak kecil, saya selalu punya ketertarikan terhadap awal-mula alam semesta. Namun, pandangan sekilas pada bidang tersebut cukup membuktikan ia sangat primitif dan memalukan. Ia sama sekali bukan sains berdasar eksperimen, di mana seseorang bisa menguji hipotesis dengan instrumen presisi, tapi sekadar kumpulan teori amat spekulatif dan longgar. Para kosmolog terlibat dalam perdebatan panas apakah alam semesta terlahir dalam

suatu ledakan kosmik ataukah ia senantiasa eksis dalam keadaan tetap. Tapi dengan data yang begitu sedikit, teori-teori tersebut cepat melampaui data. Singkatnya, semakin sedikit data, semakin sengit debat.

Sepanjang sejarah kosmologi, kekurangan data andal ini juga mengarah pada perseteruan panjang dan sengit di antara para astronom, yang seringkali berkecamuk selama berdekade-dekade. (Contoh, persis sebelum astronom Allan Sandage dari Mount Wilson Observatory memberikan ceramah soal umur alam semesta, pembicara sebelumnya mengumumkan secara sarkastis, "Apa yang akan hadirin dengar setelah ini semuanya salah." Lalu Sandage, setelah mendengar bagaimana kelompok pesaing mendapat banyak publisitas, memekik, "Mereka gerombolan. Ini perang—ini perang!")

Umur Alam Semesta

Para astronom terutama antusias untuk mengetahui umur alam semesta. Selama berabad-abad, cendekiawan, pendeta, dan teolog sudah mencoba memperkirakan umur alam semesta dengan memakai satu-satunya metode yang tersedia: silsilah manusia sejak Adam dan Hawa. Di abad lalu, para geolog menggunakan residu radiasi yang terpendam dalam bebatuan untuk memperoleh estimasi terbaik umur Bumi. Sebagai perbandingan, satelit WMAP hari ini telah mengukur gema *big bang* untuk memberitahu kita umur alam semesta yang paling otoritatif. Data WMAP mengungkap alam semesta dilahirkan dalam sebuah ledakan berapi yang terjadi 13,7 miliar tahun lampau.

(Selama bertahun-tahun, salah satu fakta paling memalukan yang merundung kosmologi adalah bahwa umur alam semesta seringkali dihitung lebih muda daripada umur planet-planet dan bintang-bintang, akibat cacatnya data. Estimasi terdahulu untuk umur alam semesta adalah 1 sampai 2 miliar tahun, kontradiktif dengan umur Bumi [4,5 miliar tahun] dan bintang-bintang tertua [12 miliar tahun]. Kontradiksi ini sekarang telah disingkirkan.)

WMAP menambah corak baru dan ganjil pada perdebatan dari apa alam semesta terbuat, sebuah pertanyaan yang diajukan orang-orang Yunani lebih dari 2.000 tahun silam. Selama seabad lalu, para ilmuwan merasa yakin telah mengetahui jawaban untuk pertanyaan tersebut. Setelah ribuan eksperimen mendalam, ilmuwan menyimpulkan alam semesta pada dasarnya terbuat dari sekitar seratusan jenis atom berlainan, tersusun dalam grafik periodik yang rapi, dimulai dengan unsur hidrogen. Ini membentuk dasar ilmu kimia modern dan bahkan diajarkan dalam setiap pelajaran sains SMU. WMAP meruntuhkan keyakinan ini.

Memperkuat eksperimen sebelumnya, satelit WMAP menunjukkan bahwa materi tampak (*visible matter*) yang kita lihat di sekeliling kita (termasuk gunung, planet, bintang, dan galaksi) hanya menyusun 4 persen dari total kandungan materi dan energi di alam semesta. (Dari 4 persen itu, mayoritas berbentuk hidrogen dan helium, dan mungkin hanya 0,03 persen yang berbentuk unsur berat.) Sebagian besar alam semesta sebenarnya terbuat dari material tak tampak yang misterius, yang asal-usulnya tidak diketahui sama sekali. Unsur-unsur familiar

yang menyusun dunia kita hanya 0,03 persen di alam semesta. Dalam beberapa hal, sains sedang terlempar berabad-abad ke masa lalu, sebelum munculnya hipotesis atom, selagi fisikawan bergumul dengan fakta bahwa alam semesta didominasi oleh bentuk-bentuk materi dan energi tak dikenal dan sepenuhnya baru.

Berdasarkan WMAP, 23 persen alam semesta terbuat dari suatu unsur aneh dan tak diketahui pasti asal-usulnya yang disebut *dark matter*, yang mempunyai berat, melingkungi galaksi-galaksi dalam bentuk halo raksasa, namun tak bisa dilihat sama sekali. *Dark matter* sangat berlimpah dan mudah menyebar sehingga, di galaksi Bima Sakti kita sendiri, lebih berat daripada semua bintang dengan selisih faktor 10. Meski tak bisa dilihat, *dark matter* aneh ini dapat diamati secara tidak langsung oleh para ilmuwan sebab ia menekuk cahaya bintang, seperti gelas, dan karenanya dapat ditemukan melalui besaran distorsi optik yang ia hasilkan.

Terkait hasil ganjil yang didapat dari satelit WMA, astronom Princeton, John Bahcall, berkata, "Kita tinggal di alam semesta yang luar biasa dan tak masuk akal, terlepas dari karakteristik penegas yang kita ketahui sekarang."

Tapi mungkin kejutan terbesar dari data WMAP, data yang membuat komunitas ilmiah tergoncang, adalah bahwa 73 persen alam semesta, angka tertinggi sejauh ini, terbuat dari bentuk energi yang sama sekali tak dikenal bernama *dark energy*, atau energi tak tampak yang tersembunyi di kehampaan angkasa. Diperkenalkan oleh Einstein pada tahun 1917 tapi kemudian dibuang (dia menyebutnya "blunder

terbesar"), *dark energy*, atau energi kenihilan atau ruang hampa, kini muncul kembali sebagai tenaga pendorong di seluruh alam semesta. *Dark energy* ini sekarang dipercaya menciptakan medan antigravitasi baru yang mendorong galaksi-galaksi saling menjauh. Nasib akhir alam semesta itu sendiri akan ditentukan oleh *dark energy*.

Saat ini tak ada yang paham dari mana "energi kenihilan" ini berasal. "Terus terang saja, kita tidak memahaminya. Kita tahu efek yang dimilikinya [tapi] kita sama sekali tak punya petunjuk...semua orang tidak punya petunjuk soal ini," demikian pengakuan Craig Hogan, seorang astronom dari Universitas Washington, Seattle.

Jika kita menggunakan teori partikel subatom terbaru dan berusaha menghitung harga *dark energy* ini, kita menjumpai selisih angka sebesar 10^{120} (angka 1 diikuti 120 angka 0). Selisih antara teori dan eksperimen ini merupakan jurang terlebar yang pernah ditemukan dalam sejarah sains. Ini salah satu aib terbesar kita—teori terbaik kita tak mampu mengkalkulasi harga sumber energi terbesar di seluruh alam semesta. Tentu saja, rak penuh Hadiah Nobel sedang menanti sosok-sosok perintis yang sanggup membongkar misteri *dark matter* dan *dark energy*.

Inflasi

Astronom masih mencoba mengarungi banjir data dari WMAP ini. Selagi ia menyapu bersih konsepsi alam semesta yang lama, gambaran kosmologi baru sedang muncul. "Kita telah meletakkan batu landasan teori kosmos yang koheren dan terpadu," terang Charles L. Bennett,

yang memimpin sebuah tim internasional yang membantu membangun dan menganalisa satelit WMAP. Sejauh ini teori utama adalah *"inflationary universe theory"* (teori alam semesta berinflasi), perbaikan besar teori *big bang* dan pertama kali diajukan oleh fisikawan Alan Guth dari MIT. Menurut skenario inflasi, pada sepertriliun triliun detik pertama, sebuah gaya antigravitasi misterius menyebabkan alam semesta mengembang jauh lebih cepat daripada yang diperkirakan semula. Periode inflasi ini luar biasa eksplosif, di mana alam semesta mengembang jauh lebih cepat daripada kecepatan cahaya. (Ini tidak melanggar diktum Einstein bahwa tak ada yang mampu melebihi kecepatan cahaya, sebab yang mengembang ini adalah ruang hampa. Untuk objek materil, batas kecepatan cahaya tak dapat dipatahkan.) Dalam sepecahan detik, alam semesta mengembang luar biasa sebesar faktor 10^{50}.

Untuk memvisualisasikan kekuatan periode inflasi ini, bayangkan sebuah balon yang sedang dipompa secara pesat, dengan galaksi-galaksi terlukis di permukaannya. Alam semesta kita yang dihuni bintang dan galaksi semuanya terletak di permukaan balon ini, bukan di bagian dalamnya. Kemudian gambarlah sebuah lingkaran mikroskopis pada permukaan balon. Lingkaran kecil ini merepresentasikan *visible universe* yang bisa dilihat dengan teleskop-teleskop kita. (Sebagai perbandingan, seandainya seluruh *visible universe* berukuran sekecil partikel subatom, maka alam semesta yang sesungguhnya jauh lebih besar dari alam semesta tampak yang ada di sekeliling kita.) Dengan kata lain, perluasan inflasi begitu hebat sehingga terdapat

kawasan-kawasan alam semesta di luar *visible universe* yang takkan pernah terjangkau oleh kita.

Saking besarnya inflasi, balon tersebut tampak flat di kisaran kita, fakta yang telah diverifikasi oleh eksperimen satelit WMAP. Sebagaimana Bumi terlihat flat karena kita begitu kecil dibanding radius Bumi, pun alam semesta terlihat flat karena ia melengkung pada skala yang jauh lebih besar.

Dengan berasumsi alam semesta awal mengalami proses inflasi ini, kita hampir dapat dengan mudah menjelaskan banyak teka-teki menyangkut alam semesta, misalnya mengapa ia terlihat flat dan seragam. Mengomentari teori inflasi, fisikawan Joel Primack berkata, "Teori indah semacam ini belum pernah keliru."

Multiverse

Teori alam semesta berinflasi, meski cocok dengan data satelit WMAP, masih belum menjawab pertanyaan: apa yang menyebabkan inflasi? Apa yang menyalakan gaya antigravitasi yang menginflasi alam semesta? Ada lebih dari 50 usulan yang menjelaskan penyebab inflasi dan apa yang menghentikannya, hingga menghasilkan alam semesta yang kita saksikan di sekeliling kita. Namun belum ada konsensus universal. Kebanyakan fisikawan bergumul seputar inti gagasan periode inflasi pesat, tapi tidak ada usulan definitif untuk menjawab pertanyaan: apa mesin di balik inflasi itu.

Karena tak seorangpun tahu persis bagaimana inflasi dimulai, maka senantiasa ada kemungkinan bahwa mekanisme inflasi dapat

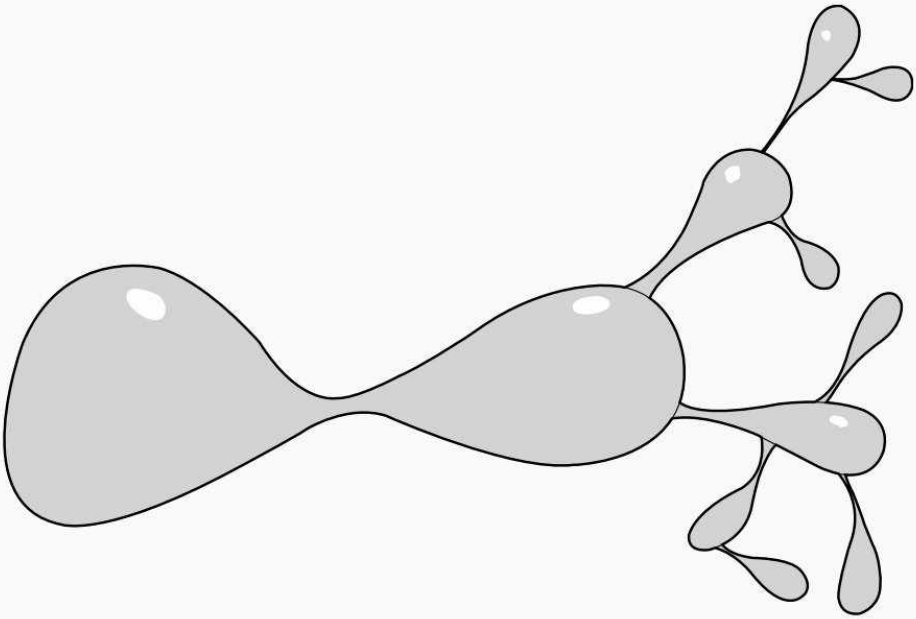
terjadi kembali—bahwa ledakan inflasi dapat terjadi berulangkali. Inilah gagasan yang diajukan oleh fisikawan Rusia, Andrei Linde, dari Universitas Stanford—bahwa mekanisme apapun yang membuat sebagian alam semesta mendadak berinflasi masih bekerja hingga hari ini, dan barangkali secara sembarang menyebabkan kawasan-kawasan jauh turut berinflasi.

Menurut teori ini, sebidang kecil alam semesta boleh jadi mendadak berinflasi dan "berpucuk", menunaskan "puteri" alam semesta atau "bayi" alam semesta, yang mungkin pada gilirannya memucukkan bayi alam semesta lain; dan proses pemucukan ini berlangsung selamanya. Bayangkan meniup gelembung sabun ke udara. Jika tiupan kita cukup keras, sebagian gelembung sabun membelah dua dan menghasilkan gelembung baru. Dengan cara yang sama, alam semesta mungkin terus-menerus melahirkan alam-alam semesta baru. Menurut skenario ini, *big bang* terjadi secara terus-menerus. Jika benar, barangkali kita tinggal di sebuah lautan alam semesta, seperti gelembung yang mengapung di samudera gelembung. Singkatnya, kata yang lebih tepat adalah "multiverse" atau "mega-verse", bukan "universe".

Linde menyebut teori ini *eternal self-producing inflation*, atau "inflasi balau", sebab memprediksi proses inflasi alam-alam semesta paralel yang tiada akhir. "Inflasi sangat memaksakan gagasan *multiple universe* pada kita," kata Alan Guth, yang pertama kali mengajukan teori inflasi.

Teori ini juga mengandung arti bahwa alam semesta kita mungkin

kelak memucukkan bayi alam semestanya sendiri. Barangkali alam semesta kita sendiri bermula dengan berpucuk dari alam semesta yang lebih awal dan lebih purba.



Gambar 2: Bukti teoritis yang mendukung eksistensi multiverse, di mana seluruh alam semesta terus-menerus bertunas atau "berpucuk" dari alam-alam semesta lain, semakin menumpuk. Jika benar, ini akan menyatukan dua mitologi keagamaan besar, Genesis dan Nirwana. Genesis akan terus-menerus berlangsung dalam struktur Nirwana tak berwaktu.

Sebagaimana dikatakan astronom Royal of Great Britain, Sir Martin Rees, "Apa yang lazim kita sebut 'alam semesta' boleh jadi merupakan salah satu anggota kumpulan. Mungkin tak terhitung yang eksis dengan hukum berbeda. Alam semesta tempat kita muncul adalah bagian dari subhimpunan tak biasa yang memperkenankan

berkembangnya kompleksitas dan kesadaran."

Semua riset terkait multiverse ini telah melahirkan spekulasi tentang seperti apakah alam-alam semesta lain itu, apakah mereka berpenghuni, dan bahkan apakah mungkin kita menjalin kontak dengan mereka. Kalkulasi sudah dilakukan oleh para ilmuwan di Cal Tech, MIT, Princeton, dan pusat-pusat pengetahuan lain untuk memastikan apakah memasuki alam semesta paralel konsisten dengan hukum fisika.

Teori-M dan Dimensi Kesebelas

Ide alam semesta paralel pernah dicurigai oleh para ilmuwan sebagai bidang mistik, klenik, dan aneh. Ilmuwan yang berani mengerjakan alam semesta paralel menjadi sasaran cemoohan dan membahayakan karirnya sendiri, sebab sampai hari ini tak ada bukti eksperimen yang membuktikan eksistensinya.

Tapi belakangan opini berbalik dramatis; intelek-intelek terbaik di planet ini sedang bekerja mati-matian pada subjek tersebut. Alasan perubahan mendadak ini adalah kehadiran sebuah teori baru, teori string, dan versi teranyarnya, teori-M, yang bukan hanya menjanjikan pengungkapan alam multiverse tapi juga memungkinkan kita "membaca Pikiran Tuhan", sebagaimana Einstein pernah katakan dengan fasih. Jika terbukti benar, ini akan melambangkan puncak pencapaian riset fisika dalam dua ribu tahun terakhir, sejak orang-orang Yunani pertama kali memulai pencarian teori alam semesta yang komprehensif dan koheren.

Jumlah makalah yang diterbitkan terkait teori string dan teori-M sangat menggemparkan, hingga puluhan ribu. Ratusan konferensi internasional telah diadakan. Semua universitas ternama di dunia memiliki kelompok yang sedang mengerjakan teori string ataupun mati-matian mempelajarinya. Walaupun teori ini belum bisa diuji dengan instrumen lemah kita hari ini, ia telah memercikkan minat sangat besar di kalangan fisikawan, matematikawan, dan bahkan pelaku eksperimen yang berharap dapat menguji batas teori ini di masa mendatang dengan detektor gelombang gravitasi canggih di luar angkasa dan *atom smasher* raksasa.

Kelak, teori ini mungkin akan menjawab pertanyaan yang telah merundung para kosmolog sejak teori *big bang* pertama kali diusulkan: apa yang terjadi sebelum *big bang*?

Ini mengharuskan kita mengerahkan segenap kekuatan pengetahuan fisika, setiap penemuan fisika yang dikumpulkan selama berabad-abad. Dengan kata lain, kita butuh "*theory of everything*" ("teori segala"), teori tentang setiap gaya fisikal yang menggerakkan alam semesta. Einstein menghabiskan 30 tahun terakhir hidupnya dengan memburu teori ini, tapi pada akhirnya dia gagal.

Saat ini, teori utama (dan tunggal) yang mampu menjelaskan keanekaragaman gaya yang kita lihat mengemudikan alam semesta adalah teori string atau, dalam inkarnasi terbarunya, teori-M. (M berarti "*membrane*" tapi bisa juga berarti "*mystery*", "*magic*", bahkan "*mother*". Walaupun teori string dan teori-M pada dasarnya identik, teori-M merupakan kerangka yang lebih misterius dan lebih rumit,

yang mempersatukan berbagai teori string.)

Sejak zaman Yunani para filsuf berspekulasi bahwa blok dasar penyusun materi mungkin terbuat dari partikel-partikel kecil yang disebut atom. Hari ini, dengan pemecah atom dan akselerator partikel canggih, kita dapat mengurai atom menjadi elektron dan nukleus, yang kemudian bisa dipecah menjadi partikel-partikel subatom yang lebih kecil lagi. Tapi alih-alih menemukan kerangka sederhana dan elegan, payahnya kita mendapati ratusan partikel subatom bercucuran dari akselerator kita, dengan nama-nama asing seperti neutrino, quark, meson, lepton, hadron, gluon, boson W, dan sebagainya. Sulit dipercaya, alam raya, pada level paling fundamental, dapat menciptakan hutan partikel subatom ganjil yang membingungkan.

Teori string dan teori-M didasarkan pada gagasan sederhana dan elegan bahwa keanekaragaman partikel subatom yang menyusun alam semesta mirip dengan not yang dimainkan pada senar biola, atau pada membran semisal drum/gendang. (Mereka bukan senar atau membran biasa; mereka eksis di *hyperspace* sepuluh-dimensi dan sebelas-dimensi.)

Secara tradisional, fisikawan memandang elektron sebagai partikel titik yang sangat kecil. Artinya fisikawan harus memperkenalkan partikel titik berbeda untuk masing-masing dari ratusan partikel subatom yang mereka temukan, dan ini memusingkan sekali. Tapi menurut teori string, andai kita punya supermikroskop yang mampu mengintip inti elektron, kita akan melihat bahwa ia bukan partikel titik sama sekali, melainkan string kecil yang bervibrasi. Ia terlihat

sebagai partikel titik karena instrumen kita terlalu mentah.

String kecil ini bervibrasi pada frekuensi dan resonansi berbeda-beda. Andai kita memetik string bervibrasi ini, ia akan berubah mode dan menjadi partikel subatom lain, misalnya quark. Dipetik lagi, ia berubah jadi neutrino. Dengan demikian, kita dapat menjelaskan badai partikel subatom sebagai not-not musikal string belaka. Sekarang kita bisa mengganti ratusan partikel subatom yang terlihat di laboratorium dengan satu objek saja, string.

Dalam perbendaharaan kosakata baru ini, hukum fisika, yang dikonstruksi secara hati-hati setelah ribuan tahun eksperimen, tak lain adalah hukum harmoni yang bisa dituliskan untuk string dan membran. Hukum kimia adalah melodi yang bisa dimainkan dengan string ini. Alam semesta adalah simfoni senar. Dan "Pikiran Tuhan", yang Einstein tulis dengan jelas, adalah musik kosmik yang menggema ke seluruh *hyperspace*. (Ini menimbulkan pertanyaan: jika alam semesta merupakan simfoni senar, maka adakah komposernya? Saya membahas pertanyaan ini di bab 12.)

Analogi Musik	**Padanan String**
Notasi musik	Matematika
Senar biola	Superstring
Not	Partikel subatom
Hukum harmoni	Fisika
Melodi	Kimia
Alam semesta	Simfoni senar

"Pikiran Tuhan"	Musik yang menggema ke seluruh *hyperspace*
Komposer	?

Akhir Alam Semesta

WMAP tak hanya memberikan pandangan paling akurat mengenai alam semesta awal, ia juga memberi gambaran paling detil tentang bagaimana alam semesta kita akan mati. Selain mendorong galaksi-galaksi saling menjauh di permulaan masa, kini gaya antigravitasi misterius sedang mendorong alam semesta menuju nasib akhirnya. Sebelumnya para astronom mengira perluasan alam semesta berangsur-angsur menurun. Sekarang kita sadar alam semesta justru sedang berakselerasi; galaksi-galaksi menjauhi kita dengan kecepatan yang bertambah. *Dark energy* yang menyusun 73 persen materi dan energi di alam semesta sedang mempercepat perluasan alam semesta, mendorong galaksi-galaksi saling menjauh dengan kecepatan terus bertambah. "Alam semesta berperilaku seperti seorang pengemudi yang melambat menjelang lampu merah dan kemudian menginjak pedal gas saat lampu berganti hijau," ucap Adam Riess dari Space Telescope Institute.

Jika tak terjadi sesuatu yang membalikkan perluasan ini, 150 miliar tahun lagi galaksi Bima Sakti kita akan sangat lengang, 99,99999 persen galaksi-galaksi terdekat akan melaju melewati tepi *visible universe* (alam semesta tampak). Galaksi-galaksi familiar di langit

malam akan pergi cepat-cepat sehingga cahaya mereka takkan pernah lagi menjangkau kita. Mereka tidak menghilang, melainkan terlalu jauh untuk diamati oleh teleskop kita. Walaupun *visible universe* mengandung sekitar 100 miliar galaksi, dalam waktu 150 miliar tahun ke depan cuma beberapa ribu galaksi dalam supergugus galaksi lokal yang akan terlihat. Bahkan selanjutnya, tinggal kelompok lokal kita, terdiri dari sekitar 36 galaksi, yang akan menyusun keseluruhan alam semesta tampak, sedangkan miliaran galaksi hanyut melampaui tepi horison. (Ini lantaran gravitasi dalam kelompok lokal cukup untuk mengatasi perluasan. Ironisnya, sementara galaksi-galaksi jauh menjauh dari pandangan kita, astronom yang hidup di era gelap ini mungkin tidak mendeteksi perluasan alam semesta sama sekali, sebab kelompok lokal galaksi sendiri tidak meluas/mengembang. Jauh di masa depan, para astronom yang menganalisa langit malam untuk pertama kali mungkin tidak menyadari adanya perluasan dan menyimpulkan alam semesta itu statis dan terdiri dari 36 galaksi saja.)

Jika gaya antigravitasi ini terus berlanjut, alam semesta pada akhirnya akan mati dalam *big freeze*. Semua makhluk berakal di alam semesta akan mati membeku, sebab temperatur ruang angkasa terjun ke titik nol, di mana molekul-molekul sendiri hampir tidak bisa bergerak. Pada suatu masa triliunan triliunan tahun dari sekarang, bintang-bintang akan berhenti bersinar, api nuklir mereka akan padam karena kehabisan bahan bakar, menggelapkan langit malam untuk selama-lamanya. Perluasan kosmik hanya akan menyisakan alam semesta yang mati dan dingin berisi bintang kerdil hitam,

bintang neutron, dan *black hole*. Dan lebih jauh di masa depan, *black hole* sendiri akan menguapkan energinya, menyisakan kabut dingin tak bernyawa berisi partikel-partikel unsur yang hanyut. Di alam semesta sedingin dan sesuram itu, kehidupan berakal, menurut definisi apapun, secara fisikal mustahil. Hukum besi termodinamika melarang transfer informasi apapun di lingkungan beku demikian, dan seluruh kehidupan pasti berhenti.

Kesadaran bahwa alam semesta akan mati membeku pertama kali muncul di abad kedelapan belas. Mengomentari konsep muram bahwa hukum fisika rupa-rupanya membawa hukuman bagi semua makhluk berakal, Charles Darwin menulis, "Seraya percaya, seperti halnya saya, bahwa manusia di masa depan akan menjadi makhluk yang jauh lebih sempurna daripada sekarang, adalah pemikiran yang tak bisa ditolerir bahwa ia dan semua makhluk berperasaan lain ditakdirkan untuk mengalami pembinasaan menyeluruh setelah kemajuan yang demikian panjang dan lamban." Sayangnya, data terbaru satelit WMAP kelihatannya menegaskan ketakutan terburuk Darwin.

Melarikan Diri ke Hyperspace

Hukum fisika menyatakan makhluk berakal di alam semesta akan menghadapi ajal ini. Tapi hukum evolusi menyebut, saat lingkungan berubah, makhluk hidup pasti pergi, atau beradaptasi, atau mati. Karena mustahil untuk beradaptasi dengan alam semesta yang sedang membeku menuju kematian, satu-satunya opsi adalah mati—atau meninggalkan alam semesta itu sendiri. Ketika menghadapi ajal alam

semesta, mungkinkah peradaban-peradaban triliunan tahun di depan kita akan merangkai teknologi untuk meninggalkan alam semesta kita dengan "sekoci" dimensi lalu berlayar ke alam semesta lain yang lebih muda dan lebih hangat? Atau akankah mereka memakai teknologi superior untuk membuat "lengkungan waktu" kemudian pergi ke masa lalu, di mana temperatur jauh lebih hangat?

Sebagian fisikawan sudah mengusulkan sejumlah skema masuk akal, meski amat spekulatif, dengan ilmu fisika paling maju yang tersedia, untuk menyediakan pandangan paling realistis terkait gerbang atau portal dimensi menuju alam semesta lain. Papan-papan tulis di laboratorium fisika di seluruh dunia penuh dengan persamaan abstrak, sejak para fisikawan memperhitungkan apakah kita dapat memakai "energi eksotis" dan *black hole* untuk menemukan terusan ke alam semesta lain. Bisakah sebuah peradaban maju, mungkin jutaan hingga miliaran tahun di depan kita dalam hal teknologi, mengeksploitasi hukum fisika untuk memasuki alam semesta lain?

Kosmolog Stephen Hawking dari Universitas Cambridge pernah bergurau, "*Wormhole*, seandainya eksis, akan ideal untuk perjalanan antariksa cepat. Anda bisa melintasi *wormhole* menuju sisi lain galaksi dan pulang tepat waktu untuk makan malam."

Dan jika *wormhole* dan portal dimensi terlalu kecil untuk melintaskan eksodus terakhir dari alam semesta kita, maka ada satu opsi lain: menurunkan total kandungan informasi peradaban cerdas nan maju sampai level molekular dan menyuntikkannya lewat gerbang tersebut, yang kemudian akan terangkai sendiri di sisi lain.

Dengan cara ini, sebuah peradaban dapat menyuntikkan benihnya lewat gerbang dimensi dan menyusun ulang dirinya, beserta seluruh kejayaannya. *Hyperspace*, bukan sekadar mainan para fisikawan teoritis, berpotensi menjadi jalan keselamatan bagi makhluk berakal di alam semesta sekarat.

Tapi untuk memahami penuh implikasi peristiwa ini, kita harus paham dulu bagaimana kosmolog dan fisikawan tiba dengan susah-payah pada kesimpulan-kesimpulan mengejutkan ini. Sepanjang *Dunia Paralel* ini, kita mengulas sejarah kosmologi, menitikberatkan pada paradoks yang merundungnya selama berabad-abad, memuncak dalam teori inflasi, yang, seraya konsisten dengan semua data eksperimen, memaksa kita mempertimbangkan konsep *multiple universe*.

Bab 2
Alam Semesta yang Paradoks

> Andai aku hadir pada saat penciptaan, akan kuberikan beberapa petunjuk berguna untuk penataan alam semesta yang lebih baik.
>
> —Alphonse the Wise

> Tata surya terkutuk. Cahayanya jelek; planet-planet terlalu jauh; terusik dengan komet; rancangan yang lemah; aku bisa membuat [alam semesta] yang lebih baik.
>
> —Lord Jeffrey

Dalam sandiwara *As You Like It*, Shakespeare menulis kata-kata abadi berikut:

> *Dunia ini hanyalah panggung,*
> *semua pria dan wanita hanya pemain.*
> *Mereka punya pintu keluar dan masuk.*

Selama Abad Pertengahan, dunia memang panggung, tapi kecil dan statis, terdiri dari Bumi kecil dan flat yang di sekelilingnya benda-benda angkasa bergerak misterius dalam bulatan samawi sempurna. Komet dipandang sebagai pertanda yang meramalkan kematian raja.

Ketika komet besar tahun 1066 meluncur di atas Inggris, para prajurit Saxon Raja Harold ketakutan. Dia segera kalah oleh pasukan William Sang Penakluk yang merangsek maju, mengatur pentas untuk pendirian Inggris modern.

Komet yang sama meluncur sekali lagi di atas Inggris pada tahun 1682, lagi-lagi membangkitkan ketakjuban dan kekhawatiran di seluruh Eropa. Semua orang, sepertinya, dari petani sampai raja, terhipnotis oleh tamu tak terduga yang melintas di langit. Dari mana komet itu berasal? Ke mana ia pergi, dan apa artinya ini?

Edmund Halley, seorang pria kaya dan astronom amatir, begitu terpesona oleh komet tersebut hingga meminta pendapat salah satu ilmuwan terbesar, Isaac Newton. Ketika dia bertanya kepada Newton kekuatan apa yang mengendalikan gerakan komet tersebut, dengan tenang Newton menjawab bahwa komet itu bergerak secara elips sebagai konsekuensi dari hukum gaya kuadrat terbalik (yaitu gaya terhadap komet dikurangi kuadrat jaraknya dari matahari). Bahkan, ujar Newton, dirinya telah menelusuri komet tersebut dengan teleskop ciptaannya sendiri (teleskop reflektor yang hari ini dipakai oleh astronom di seluruh dunia) dan garis edarnya mengikuti hukum gravitasi yang telah dia kembangkan dua puluh tahun sebelumnya.

Halley terkejut tak percaya. "Bagaimana Anda tahu?" tanya Halley. "Saya sudah mengkalkulasinya," jawab Newton. Halley sama sekali tak pernah menyangka akan mendengar bahwa rahasia benda-benda angkasa, yang telah mengherankan manusia sejak pertama kali memandang langit, bisa dijelaskan oleh hukum gravitasi baru.

Terperanjat oleh signifikansi terobosan monumental ini, dengan murah hati Halley menawarkan pembiayaan untuk penerbitan teori baru ini. Pada 1687, dengan dorongan dan pendanaan Halley, Newton menerbitkan karya epiknya, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Mathematical Principles of Natural Philosophy*). Ini dielu-elukan sebagai salah satu karya terpenting yang pernah diterbitkan. Dalam satu pukulan, para ilmuwan yang tak tahu-menahu hukum tata surya tiba-tiba mampu memprediksikan gerakan benda-benda angkasa dengan presisi tepat.

Dampak *Principia* itu begitu besar di salon-salon dan istana-istana Eropa sampai penyair Alexander Pope menulis:

> *Alam dan hukum alam tersembunyi di tengah malam gulita,*
> *Tuhan berfirman, "Jadilah Newton!" maka datanglah pelita.*

(Halley sadar, jika orbit komet berbentuk elips, maka kita dapat mengkalkulasi kapan ia akan melayang di atas London lagi. Memeriksa catatan lama, dia mendapati bahwa komet tahun 1531, 1607, dan 1682 memang komet yang sama. Komet yang begitu penting bagi pendirian Inggris modern di tahun 1066 tersebut terlihat oleh orang-orang di sepanjang catatan sejarah, termasuk Julius Caesar. Halley memprediksi komet itu akan kembali pada 1758, jauh setelah Newton dan Halley wafat. Ketika komet itu betul-betul kembali di Hari Natal tahun tersebut sesuai jadwal, ia dinamai komet Halley.)

Newton menemukan hukum gravitasi universal 20 tahun sebelumnya, ketika wabah hitam menghentikan operasi Universitas Cambridge dan dia terpaksa mengasingkan diri ke perkebunan desa di

Woolsthorpe. Dengan penuh gairah dia mengenang, selagi berjalan-jalan di perkebunannya dia melihat apel jatuh. Saat itu dia menanyakan pada dirinya sendiri sebuah pertanyaan yang kelak mengubah sejarah manusia: jika apel jatuh, apakah bulan juga jatuh? Dengan ilham brilian, Newton menyadari bahwa apel, bulan, dan planet semuanya mematuhi hukum gravitasi yang sama, bahwa mereka semua mematuhi hukum kuadrat terbalik. Begitu Newton mendapati matematika abad 17 terlalu primitif untuk memecahkan hukum gaya ini, dia menciptakan cabang matematika baru, kalkulus, untuk menetapkan gerakan apel jatuh dan bulan.

Dalam *Principia*, Newton juga menuliskan hukum mekanika, hukum gerak yang menetapkan trayektori semua benda bumi dan angkasa. Hukum ini meletakkan dasar untuk perancangan mesin, pemanfaatan tenaga uap, dan pembuatan lokomotif, yang pada gilirannya membantu melapangkan jalan untuk Revolusi Industri dan peradaban modern. Hari ini, setiap gedung pencakar langit, setiap jembatan, dan setiap roket, semuanya dikonstruksi menggunakan hukum gerak milik Newton.

Newton bukan cuma memberi kita hukum gerak yang abadi; dia juga menjungkirbalikkan pandangan keduniaan kita, memberi kita gambaran alam semesta yang sama sekali baru di mana hukum misterius yang mengatur benda-benda angkasa identik dengan hukum yang mengatur Bumi. Panggung kehidupan tak lagi dikelilingi oleh pertanda angkasa menyeramkan; hukum yang berlaku pada aktor berlaku pula pada set panggung.

Paradoks Bentley

Karena *Principia* merupakan karya ambisius, ia mengangkat paradoks menggelisahkan pertama tentang konstruksi alam semesta. Jika dunia adalah panggung, maka seberapa besar ia? Apakah tidak terhingga atau terhingga? Ini pertanyaan berumur tua; bahkan filsuf Romawi, Lucretius, terpesona olehnya. "Alam Semesta tidak berpinggir di semua arah. Andaikata berpinggir, ia harus memiliki batas di suatu tempat. Tapi jelas, sesuatu tidak mungkin memiliki batas kecuali kalau ada sesuatu di luar yang membatasinya... Di semua dimensi, di semua sisi, ke atas atau ke bawah alam semesta, tak ada ujung."

Tapi teori Newton juga mengungkap paradoks-paradoks yang inheren dalam teori alam semesta terhingga atau tak terhingga. Pertanyaan-pertanyaan sederhana membawa pada kekacauan kontradiksi. Bahkan selagi Newton bersukaria dengan kemasyhuran berkat penerbitan *Principia*, dia menemukan bahwa teori gravitasinya tak pelak lagi dipenuhi paradoks. Pada 1692, seorang pendeta, Rev. Richard Bentley, menulis surat sederhana namun menyusahkan kepada Newton. Karena gravitasi senantiasa menarik dan tak pernah menolak, tulis Bentley, berarti kumpulan bintang sewajarnya kolaps ke dirinya sendiri. Jika alam semesta itu terhingga, maka langit malam, alih-alih konstan dan statis, semestinya menjadi adegan pembantaian luar biasa, sebab bintang-bintang saling membajak dan bergabung menjadi super-bintang yang menyala-nyala. Tapi Bentley juga menguraikan, jika alam semesta tak terhingga, maka gaya terhadap suatu objek, yang menyeretnya ke kiri atau ke kanan, juga akan tak

terhingga, dan karenanya bintang-bintang semestinya terkoyak-koyak dalam bencana berapi-api.

Mulanya Bentley seolah sudah menskakmat Newton. Baik pada alam semesta terhingga (dan kolaps menjadi bola api), ataupun pada alam semesta tak terhingga (di mana semua bintang akan tertiup berpisahan). Masing-masing kemungkinan menjadi malapetaka bagi teori belia yang diajukan Newton. Masalah ini, untuk pertama kalinya dalam sejarah, mengungkap paradoks halus namun inheren yang merembesi teori gravitasi manakala diterapkan pada seluruh alam semesta.

Setelah berpikir seksama, Newton menulis balik bahwa dirinya menemukan celah dalam argumen itu. Dia lebih menyukai alam semesta tak terhingga tapi seragam. Dengan demikian, jika sebuah bintang terseret ke kanan oleh bintang-bintang berjumlah tak terhingga, ini digagalkan oleh seretan setara dari rangkaian bintang tak terhingga lain di arah lain. Semua gaya diseimbangkan di tiap arah, menghasilkan alam semesta statis. Maka, jika gravitasi selalu menarik, solusi satu-satunya untuk paradoks Bentley adalah alam semesta tak terhingga namun seragam.

Newton memang menemukan celah dalam argumen Bentley. Tapi Newton cukup pintar untuk menyadari kelemahan jawabannya sendiri. Dia mengakui dalam sebuah surat bahwa solusinya tidak kokoh, walaupun benar secara teknis. Alam semesta tak terhingga namun seragam milik Newton mirip dengan rumah kartu: tampak kokoh, tapi besar kemungkinan untuk ambruk oleh disturbansi sekecil

apapun. Kita dapat mengkalkulasi, bila sebuah bintang tergoncang sedikit saja, itu akan memulai reaksi berantai, dan gugus bintang akan segera kolaps. Jawaban lemah Newton adalah untuk memohon "kekuatan ilahi" yang mencegah rumah kartunya ambruk. "Diperlukan keajaiban berketerusan untuk mencegah Matahari dan bintang-bintang diam (*fixed star*) berdesak-desakan akibat gravitasi," tulisnya.

Bagi Newton, alam semesta bagaikan jam raksasa yang diputar di permulaan masa oleh Tuhan dan mendetak sejak saat itu, menurut tiga hukum geraknya, tanpa campur-tangan Ilahi. Tapi sesekali, Tuhan sendiri harus sedikit mengintervensi dan men-*tweak* alam semesta, untuk mencegahnya runtuh. (Dengan kata lain, terkadang Tuhan harus mengintervensi guna mencegah set panggung kehidupan runtuh di atas para aktor.)

Paradoks Olbers

Di samping paradoks Bentley, terdapat sebuah paradoks lebih dalam yang inheren di alam semesta tak terhingga. Paradoks Olbers ini berawal dengan mempertanyakan mengapa langit malam itu hitam. Para astronom terdahulu seperti Johannes Kepler menyadari bahwa jika alam semesta seragam dan tak terhingga, maka ke manapun memandang, Anda akan melihat cahaya dari bintang-bintang berjumlah tak terhingga. Saat menatap titik tertentu di langit malam, garis pandang kita pada akhirnya akan melintasi bintang yang tak terhitung sehingga menerima cahaya bintang dalam jumlah tak

terhingga. Jadi, langit malam semestinya menyala-nyala! Fakta bahwa langit malam hitam, bukan putih, telah menjadi paradoks kosmik yang halus namun mendalam selama berabad-abad.

Paradoks Olbers, seperti halnya paradoks Bentley, sangat sederhana tapi membuat bingung bergenerasi-generasi filsuf dan astronom. Baik paradoks Bentley maupun paradoks Olbers bergantung pada observasi, sehingga, di sebuah alam semesta tak terhingga, gaya gravitasi dan sorot cahaya dapat bergabung memberikan hasil tak terhingga yang tidak berarti. Selama berabad-abad, banyak jawaban tidak tepat telah diajukan. Kepler begitu terganggu oleh paradoks ini sehingga dia mempostulatkan alam semesta terhingga, terlingkungi dalam tempurung, dan karenanya jumlah cahaya bintang yang bisa menjangkau mata kita terbatas.

Saking hebatnya kebingungan terkait paradoks ini, sebuah studi tahun 1987 menunjukkan 70 persen buku teks astronomi memberi jawaban yang tidak tepat.

Mulanya orang akan mencoba memecahkan paradoks Olbers dengan menyatakan cahaya bintang diserap oleh awan debu. Ini jawaban yang diberikan oleh Heinrich Wilhelm Olbers sendiri pada 1823 saat pertama kali mengemukakan paradoks tersebut. Olbers menulis, "Betapa beruntung Bumi tidak menerima cahaya bintang dari setiap sudut angkasa! Tapi, terlepas dari kecerlangan dan panas tak terbayangkan, sampai 90.000 kali lipat dari yang kita rasakan sekarang, Yang Maha Kuasa bisa saja merancang organisme-organisme yang mampu beradaptasi dengan kondisi seekstrim itu."

Agar bumi tidak bermandikan "latar belakang secerlang cakram Matahari", kata Olbers, awan-awan debu harus menyerap panas hebat untuk memungkinkan kehidupan di bumi. Contoh, pusat berapi-api galaksi Bima Sakti kita sendiri, yang menurut aturan semestinya mendominasi langit malam, sebetuinya tersembunyi di balik awan debu. Jika menengok ke arah rasi Sagitarius, di mana Pusat Bima Sakti berada, kita tidak melihat bola api yang berkobar melainkan sepotong kegelapan.

Tapi awan debu tidak bisa betul-betul menjelaskan paradoks Olbers. Seiring jangka waktu tak terhingga, awan debu akan menyerap cahaya matahari dari bintang-bintang berjumlah tak terhingga dan pada akhirnya akan berpijar seperti permukaan bintang. Karenanya, awan bintang pun semestinya berkobar di langit malam.

Demikian halnya, orang mungkin menduga semakin jauh sebuah bintang, semakin redup ia. Ini memang benar, tapi ini pun tidak bisa menjadi jawaban. Jika kita memandangi sebagian langit malam, bintang-bintang amat jauh memang redup, tapi semakin jauh Anda melihat, semakin banyak bintang yang ada. Dua efek ini akan saling membatalkan di alam semesta seragam, menyisakan langit malam yang putih. (Ini karena intensitas cahaya bintang berkurang seiring kuadrat jarak, yang dibatalkan oleh fakta bahwa jumlah bintang bertambah seiring kuadrat jarak.)

Cukup aneh memang, orang pertama dalam sejarah yang memecahkan paradoks tersebut adalah penulis misteri asal Amerika, Edgar Allan Poe, yang memiliki minat lama dalam astronomi. Jauh

sebelum meninggal, dia mempublikasikan banyak observasinya dalam sebuah puisi filosofis melantur berjudul *Eureka: A Prose Poem*. Di sebuah bagian luar biasa, dia menulis:

> Seandainya suksesi bintang tak berujung-pangkal, maka latar langit akan mempertontonkan kepada kita keberkilauan seragam, seperti yang dipamerkan oleh Galaksi—*sebab sama sekali tidak mungkin ada satu titik, di antara seluruh latar itu, di mana bintang tidak eksis*. Maka satu-satunya cara, dalam keadaan demikian, agar kita dapat memahami *kehampaan* yang dijumpai oleh teleskop-teleskop kita di berbagai arah, ialah dengan menduga jarak latar yang tak kelihatan demikian besar sehingga tidak ada cahaya darinya yang sanggup menjangkau kita sama sekali.

Dia mengakhiri dengan mencatat bahwa ide tersebut "jelas terlampau indah untuk *tidak* memiliki Kebenaran sebagai dasarnya".

Ini merupakan kunci menuju jawaban yang tepat. Alam semesta tidak tua tak terhingga. Terdapat Genesis. Cahaya yang menggapai mata kita ada titik ujungnya. Cahaya dari bintang-bintang terjauh belum sempat menjangkau kita. Kosmolog Edward Harrison, orang pertama yang mendapati bahwa Poe telah memecahkan paradoks Olbers, menulis, "Saat pertama kali membaca kata-kata Poe, saya terpesona: Bagaimana bisa seorang penyair, paling banter ilmuwan amatir, memahami penjelasan yang benar 140 tahun silam padahal di kampus-kampus kita penjelasan yang salah....masih sedang diajar-kan?"

Pada 1901, fisikawan Skotlandia, Lord Kelvin, juga menemukan jawaban yang tepat. Dia menyadari, saat Anda memandang langit malam, Anda sedang melihatnya sebagaimana kondisinya di masa lalu, bukan sebagaimana sekarang, sebab kecepatan cahaya, walaupun sangat besar menurut standar bumi (186,282 mil per detik), masih terhingga, dan perlu waktu bagi cahaya untuk menjangkau Bumi dari bintang-bintang jauh. Kelvin mengkalkulasi, agar langit malam berwarna putih, alam semesta harus membentang ratusan triliun tahun-cahaya. Tapi karena alam semesta tidak berumur triliunan, langitnya tak pelak lagi hitam. (Juga terdapat alasan kedua mengapa langit malam hitam, yaitu masa hidup bintang-bintang, yang diukur dalam miliar tahun.)

Belakangan usaha untuk memverifikasi kebenaran solusi Poe telah dimungkinkan, memakai satelit-satelit seperti teleskop antariksa Hubble. Teleskop-teleskop canggih ini, pada gilirannya, memungkinkan kita menjawab pertanyaan yang ditanyakan oleh anak-anak sekalipun: Di mana bintang terjauh? Dan ada apa di belakang bintang terjauh? Guna menjawab pertanyaan ini astronom memprogram teleskop antariksa Hubble agar melakukan tugas bersejarah: memotret titik terjauh di alam semesta. Untuk menangkap emisi amat redup dari sudut-sudut terdalam angkasa luar, teleskop tersebut harus melaksanakan tugas yang belum pernah ada: membidik secara akurat titik yang sama di langit dekat rasi Orion selama beberapa ratus jam, yang mengharuskan teleskop sejajar sempurna selama empat ratus orbit Bumi. Proyek ini begitu sulit sehingga harus dicicil lebih dari

empat bulan.

Pada 2004, sebuah foto mempesona dirilis, dan menjadi tajuk utama di seluruh dunia. Ia memperlihatkan kumpulan 10.000 bayi galaksi selagi berkondensasi dari balau *big bang*. "Mungkin kita baru menyaksikan akhir permulaan," kata Anton Koekemoer dari Space Telescope Science Institute. Foto itu menunjukkan secampuran galaksi-galaksi redup yang berjarak lebih dari 13 miliar tahun-cahaya dari Bumi—dengan kata lain, perlu lebih dari 13 miliar tahun bagi cahaya mereka untuk menjangkau Bumi. Karena alam semesta sendiri baru berumur 13,7 miliar tahun, ini artinya galaksi-galaksi tersebut terbentuk kira-kira setengah miliar tahun pasca penciptaan, ketika bintang-bintang dan galaksi-galaksi pertama berkondensasi dari "sup" gas sisa *big bang*. "Hubble membawa kita sangat dekat dengan *big bang* itu sendiri," kata astronom Massimo Stivavelli dari Institute tersebut.

Akan tetapi ini menimbulkan pertanyaan: Ada apa di belakang galaksi-galaksi terjauh itu? Saat mengintip foto luar biasa ini, yang jelas hanya ada kegelapan di antara galaksi-galaksi ini. Kegelapan inilah yang menyebabkan langit malam berwarna hitam. Ini adalah titik batas akhir untuk cahaya dari bintang-bintang jauh. Namun, kegelapan ini sebetulnya merupakan radiasi gelombang mikro latar. Jadi jawaban final terhadap pertanyaan mengapa langit malam hitam adalah bahwa langit malam tidak betul-betul hitam. (Jika mata kita mampu melihat radiasi gelombang mikro, dan bukan cuma cahaya tampak, kita akan menyaksikan radiasi dari *big bang* itu sendiri

membanjiri langit malam. Dalam beberapa hal, radiasi dari *big bang* keluar setiap malam. Andai kita punya mata yang sanggup melihat gelombang mikro, kita bisa tahu bahwa di belakang bintang terjauh terdapat penciptaan itu sendiri.)

Einstein si Pemberontak

Saking suksesnya hukum Newton, perlu lebih dari 200 tahun bagi sains untuk mengambil langkah penting berikutnya, dengan penelitian Albert Einstein. Einstein mengawali karir sebagai kandidat paling mustahil untuk seorang revolusioner macam itu. Setelah lulus dengan gelar sarjana dari Polytechnic Institute di Zurich, Swiss, pada tahun 1900, dia merasa tak ada harapan untuk dipekerjakan. Karirnya disabotase oleh para profesornya, yang tidak menyukai mahasiswa congkak dan lancang yang sering memotong pelajaran tersebut. Surat-surat pembelaan muramnya menunjukkan sedalam apa dia merendahkan diri. Dia menganggap dirinya gagal dan menjadi beban keuangan pahit bagi orangtuanya. Dalam satu surat pilu, diakui bahwa dia bahkan mempertimbangkan untuk mengakhiri hidup: "Kemalangan orangtua saya, yang bertahun-tahun tidak mengalami masa bahagia, paling memberatkan diri saya... Saya tak lain hanyalah beban bagi kerabat... Pasti lebih baik jika saya tidak hidup sama sekali," tulisnya murung.

Dalam keputusasaan, dia berpikir untuk beralih profesi dan bergabung dengan sebuah perusahaan asuransi. Dia bahkan mengambil pekerjaan sebagai guru privat anak-anak namun beradu

argumen dengan majikannya dan dipecat. Saat kekasihnya, Mileva Maric, hamil di luar dugaan, dia sadar anak mereka akan terlahir tidak sah sebab dia tidak punya modal untuk menikahinya. (Tak ada yang tahu apa yang kemudian terjadi pada puteri tidak sahnya itu, Lieseral.) Dan syok pribadi mendalam yang dirasakan saat ayahnya mendadak meninggal menyisakan luka emosional yang tak pernah terobati sepenuhnya. Ayahnya meninggal dengan membawa anggapan bahwa puteranya telah gagal.

Walaupun tahun 1901-1902 barangkali menjadi periode terburuk dalam hidup Einstein, karirnya diselamatkan oleh rekomendasi teman sekelas, Marcel Grossman, yang mampu memanfaatkan kekuasaan dan mengamankan pekerjaan untuknya sebagai juru tulis rendahan di Swiss Patent Office di Bern.

Paradoks Relativitas

Di permukaan, Kantor Paten tersebut merupakan tempat mustahil untuk melancarkan revolusi terbesar dalam fisika sejak Newton. Tapi itu menyimpan keuntungan tersendiri. Setelah cepat-cepat menyelesaikan aplikasi paten yang menumpuk di atas meja, Einstein biasa duduk tenang dan mengingat impiannya sewaktu kecil. Di masa muda, Einstein pernah membaca sebuah buku, *People's Book on Natural Science* karya Aaron Bernstein, "sebuah karya yang saya baca dengan penuh perhatian," kenangnya. Bernstein meminta pembaca membayangkan berjalan di samping arus listrik yang menyusuri kawat telegraf. Saat berusia 16 tahun, Einstein menanyakan

pertanyaan serupa kepada dirinya sendiri: akan terlihat seperti apa sorot cahaya bila Anda dapat mengejarnya? Einstein mengenang, "Prinsip demikian dihasilkan dari sebuah paradoks yang sudah saya temukan di usia 16: jika saya mengejar sorot cahaya dengan kecepatan *c* (kecepatan cahaya di ruang vakum), semestinya saya melihat sorot cahaya seperti medan elektromagnetik berosilasi spasial yang diam. Namun rasanya tak ada hal semacam itu, baik berdasarkan pengalaman ataupun menurut persamaan Maxwell." Sebagai seorang anak kecil Einstein berpikir, jika Anda dapat berpacu di samping sorot cahaya, ia semestinya terlihat membeku, seperti gelombang yang tak bergerak. Tapi tak seorangpun pernah melihat cahaya beku, berarti ada yang sangat keliru.

Di peralihan abad terdapat dua pilar fisika yang menopang segala sesuatu: teori mekanika dan gravitasinya Newton, dan teori cahayanya Maxwell. Pada 1860-an, fisikawan Skotlandia James Clerk Maxwell menunjukkan bahwa cahaya terdiri dari medan listrik dan magnet bervibrasi yang terus-menerus berubah menjadi satu sama lain. Yang Einstein temukan, dan sangat mengagetkannya, adalah bahwa dua pilar ini saling bertentangan, dan bahwa salah satu darinya harus gugur.

Dalam persamaan Maxwell, dia menemukan solusi bagi teka-teki yang telah menghantuinya selama 10 tahun. Einstein menemukan sesuatu yang dilalaikan oleh Maxwell: persamaan Maxwell menunjukkan cahaya melaju pada kecepatan konstan, tak peduli seberapa cepat Anda mencoba menyusulnya. Kecepatan cahaya *c* adalah sama di

semua kerangka lembam (yakni kerangka yang melaju pada kecepatan konstan). Entah Anda berdiri diam, naik kereta, atau duduk di atas komet yang mencepat, Anda akan melihat sorot cahaya berpacu di depan Anda pada kecepatan yang sama. Tak peduli seberapa cepat Anda bergerak, Anda tak pernah bisa mendahului cahaya.

Ini segera membawa pada semak paradoks. Untuk sejenak bayangkan seorang astronot mencoba menyusul sorot cahaya yang mencepat. Sang astronot meluncur dengan kapal roketnya sampai dia berlomba bahu-membahu dengan sorot cahaya. Penonton di Bumi yang menyaksikan pengejaran hipotetis ini akan mengklaim bahwa astronot dan sorot cahaya bergerak berdampingan. Namun, sang astronot akan mengatakan sesuatu yang sama sekali berbeda, bahwa sorot cahaya melaju jauh darinya, seolah-olah kapal roketnya diam.

Pertanyaan yang Einstein hadapi adalah: bagaimana bisa dua orang memiliki interpretasi demikian berbeda atas peristiwa yang sama? Dalam teori Newton, seseorang dapat senantiasa menyusul sorot cahaya; di dunia Einstein, ini mustahil. Tiba-tiba dia sadar, ada sebuah cacat fundamental dalam fondasi fisika. Di musim semi 1905, kenang Einstein, "sebuah badai berkecamuk dalam pikiran saya". Dalam satu pukulan, akhirnya dia menemukan solusi: *waktu berdenyut pada laju berbeda-beda, tergantung seberapa cepat Anda bergerak.* Semakin cepat Anda bergerak, semakin lambat waktu berjalan. Waktu tidaklah absolut, sebagaimana anggapan Newton dahulu. Menurut Newton, waktu berdenyut seragam di seluruh alam semesta, sehingga perlaluan satu detik di Bumi identik dengan satu detik di Yupiter atau

Mars. Jam berdenyut dalam kesinkronan absolut di seluruh alam semesta. Namun, menurut Einstein, jam berbeda-beda berdenyut pada laju berbeda-beda di seluruh alam semesta.

Jika waktu bisa berubah sesuai kecepatan Anda, sadar Einstein, maka kuantitas lain, seperti panjang, materi, dan energi, semestinya juga berubah. Dia mendapati bahwa semakin cepat Anda bergerak, semakin besar jarak berkontraksi/menyusut (yang terkadang disebut kontraksi Lorentz-FitzGerald). Demikian pula, semakin cepat Anda bergerak, semakin berat diri Anda. (Seiring Anda mendekati kecepatan cahaya, waktu akan melambat hingga berhenti, jarak akan berkontraksi hingga nihil, dan massa Anda akan jadi tak terhingga, yang kesemuanya absurd. Inilah sebabnya Anda tidak bisa mematahkan rintangan cahaya, batas kecepatan tertinggi di alam semesta.)

Distorsi aneh ruang-waktu ini menggiring seorang penyair untuk menulis:

Ada seorang pemuda bernama Fisk
yang gerak anggarnya amat taktis.
Begitu cepat dia berlaga,
sampai kontraksi FitzGerald
mencakramkan pedangnya yang tipis.

Seperti halnya terobosan Newton yang menyatukan fisika Bumi dengan fisika langit, Einstein menyatukan ruang dengan waktu. Akan tetapi dia juga menunjukkan bahwa materi dan energi berpadu dan karenanya dapat berubah menjadi satu sama lain. Jika sebuah objek menjadi semakin berat dengan semakin cepat bergerak, berarti energi

gerak sedang dialihragamkan menjadi materi. Einstein menghitung seberapa banyak energi yang akan terkonversi menjadi materi, dan dia mendapat rumus $E = mc^2$. Dengan kata lain, materi m kecil pun dikalikan dengan bilangan besar (kuadrat kecepatan cahaya) saat berubah menjadi energi E. Dengan demikian sumber energi rahasia bintang-bintang sendiri terkuak, yaitu konversi materi menjadi energi melalui persamaan ini, yang menerangi alam semesta. Rahasia bintang-bintang bisa diperoleh dari pernyataan sederhana bahwa kecepatan cahaya adalah sama di semua kerangka lembam.

Seperti halnya Newton sebelumnya, Einstein mengubah pandangan kita akan panggung kehidupan. Di dunia Newton, semua aktor tahu persis jam berapa sekarang dan bagaimana jarak diukur. Denyutan waktu dan dimensi panggung tak pernah berubah. Tapi relativitas memberi kita cara ganjil dalam memahami ruang dan waktu. Di alam semesta Einstein, semua aktor memiliki arloji yang mencatat waktu berbeda-beda. Ini artinya mustahil mensinkronkan semua arloji di panggung. Penyetelan waktu latihan untuk tengah hari mengandung hal berbeda-beda bagi aktor berbeda-beda. Bahkan, hal aneh terjadi saat para aktor berpacu di panggung. Semakin cepat mereka bergerak, semakin lambat arloji mereka berdenyut, dan semakin berat dan flat tubuh mereka.

Perlu bertahun-tahun sebelum pandangan Einstein diakui oleh komunitas ilmiah lebih luas. Tapi Einstein tidak berhenti; dia ingin menerapkan teori relativitas barunya pada gravitasi itu sendiri. Dia sadar betapa sulit ini nantinya; dia akan merusak teori paling sukses

di masanya. Max Planck, pendiri teori quantum, memperingatkannya, "Sebagai teman yang lebih tua, saya harus menasehatimu untuk tidak melakukannya, sebab kau takkan berhasil, dan sekalipun kau berhasil, tak ada yang akan percaya."

Einstein sadar teori relativitas barunya melanggar teori gravitasi Newton. Menurut Newton, gravitasi berjalan secara instan di sepanjang alam semesta. Tapi ini menimbulkan pertanyaan yang terkadang ditanyakan oleh anak-anak sekalipun: "Apa yang terjadi seandainya Matahari menghilang?" Bagi Newton, seluruh alam semesta akan menyaksikan menghilangnya Matahari secara seketlka, di waktu yang sama. Tapi menurut teori relativitas, ini mustahil, sebab menghilangnya sebuah bintang dibatasi oleh kecepatan cahaya. Menurut relativitas, kehilangan mendadak Matahari pasti menimbulkan gelombang kejut sferis gravitasi yang menyebar keluar dengan kecepatan cahaya. Di luar gelombang kejut, para pelihat akan bilang Matahari masih bersinar, karena gravitasi belum sempat menjangkau mereka. Tapi di dalam gelombang tersebut, pelihat akan bilang Matahari telah menghilang. Untuk memecahkan masalah ini, Einstein memperkenalkan gambaran ruang dan waktu yang sama sekali berbeda.

Gaya Sebagai Penekukan Ruang

Newton menganggap ruang dan waktu sebagai arena hampa nan luas di mana peristiwa-peristiwa bisa terjadi, menuruti hukum geraknya. Panggung tersebut penuh dengan keajaiban dan misteri, tapi pada

hakikatnya ia lembam dan tak bergerak, saksi pasif tarian alam. Namun, Einstein menjungkir-balikkan ide ini. Menurut Einstein, panggung itu sendiri menjadi bagian penting kehidupan. Di alam semesta Einstein, ruang dan waktu bukanlah arena statis sebagaimana diasumsikan Newton, melainkan dinamis, menekuk dan melengkung dengan cara aneh. Anggap saja panggung kehidupan diganti dengan jaring trampolin, sehingga para aktor merosot lembut akibat bobot mereka sendiri. Di atas arena demikian, kita lihat panggung menjadi sama pentingnya dengan aktor itu sendiri.

Pikirkan bola bowling yang ditaruh di atas ranjang, terbenam lembut ke dalam kasur. Nah, tembakkan sebiji kelereng ke sepanjang permukaan kasur yang melengkung. Ia akan berjalan di jalur lengkung, mengorbit bola bowling. Seorang Newtonian, menyaksikan kelereng mengedari bola bowling dari kejauhan, mungkin menyimpulkan ada suatu gaya misterius yang dikerahkan bola bowling terhadap kelereng. Seorang Newtonian mungkin menyebut bola bowling mengerahkan tarikan instan yang memaksa kelereng menuju pusat.

Menurut seorang relativis, yang dapat menyaksikan gerakan kelereng di atas ranjang dari dekat, jelas tak ada gaya sama sekali. Yang ada hanya penekukan ranjang, yang memaksa kelereng bergerak dalam garis melengkung. Menurut relativis, tidak ada tarikan, yang ada justru dorongan, dikerahkan oleh ranjang melengkung terhadap kelereng. Ganti kelereng dengan Bumi, bola bowling dengan Matahari, dan ranjang dengan ruang-waktu hampa, dan kita lihat Bumi mengelilingi Matahari bukan karena tarikan gravitasi melainkan

karena Matahari melengkungkan ruang di sekitar Bumi, menciptakan dorongan yang memaksa Bumi bergerak dalam lingkaran.

Karena itu Einstein menjadi yakin bahwa gravitasi lebih seperti kain dibanding gaya tak nampak yang beraksi secara instan di seluruh alam semesta. Bila seseorang menggoncangkan kain ini secara cepat, terbentuklah gelombang-gelombang yang berjalan di sepanjang permukaan dengan kecepatan definitif. Ini memecahkan paradoks menghilangnya matahari. Jika gravitasi merupakan produk sampingan dari penekukan ruang-waktu itu sendiri, maka menghilangnya Matahari dapat disamakan dengan pengangkatan mendadak bola bowling dari kasur. Begitu kasur mempelanting kembali ke bentuk asalnya, gelombang-gelombang menuruni seprai kasur dan berjalan dengan kecepatan definitif. Maka, dengan mereduksi gravitasi menjadi penekukan ruang dan waktu, Einstein sanggup merekonsiliasi gravitasi dan relativitas.

Bayangkan seekor semut mencoba berjalan di atas sehelai kertas kusut. Ia akan berjalan seperti pelaut yang mabuk, bergoyang ke kiri dan ke kanan, saat mencoba melintasi daerah berkerenyut tersebut. Sang semut akan protes bahwa dirinya tidak mabuk, akan tetapi gaya misteriuslah yang menariknya, merenggut dirinya ke kiri dan ke kanan. Menurut semut, ruang hampa penuh dengan gaya misterius yang mencegahnya berjalan lurus. Namun, bila memperhatikan semut dari jarak dekat, kita tahu bahwa tidak ada gaya yang menariknya sama sekali. Ia sedang terdorong oleh lipatan-lipatan kertas kusut tersebut. Gaya yang beraksi terhadap semut merupakan ilusi yang

disebabkan oleh penekukan ruang itu sendiri. "Tarikan" gaya sebenarnya merupakan "dorongan" yang tercipta ketika semut berjalan di atas lipatan kertas. Dengan kata lain, gravitasi tidak menarik; akan tetapi ruanglah yang mendorong.

Pada 1915, Einstein akhirnya mampu merampungkan apa yang dia sebut teori relativitas umum, yang sejak saat itu telah menjadi arsitektur dasar seluruh ilmu kosmologi. Dalam gambaran baru yang mengejutkan ini, gravitasi bukanlah gaya independen yang memenuhi alam semesta tapi merupakan efek nyata dari penekukan struktur ruang-waktu. Teorinya begitu hebat sampai-sampai dia dapat meringkasnya dalam persamaan sepanjang sekitar satu inchi. Dalam teori baru nan brilian ini, besaran penekukan ruang dan waktu ditentukan oleh jumlah materi dan energi yang dimuatnya. Bayangkan melemparkan batu ke dalam kolam, yang menghasilkan serangkaian riakan akibat benturan. Semakin besar batunya, semakin banyak pelengkungan permukaan kolam. Demikian pula, semakin besar ukuran bintang, semakin banyak penekukan ruang-waktu di sekeliling bintang tersebut.

Kelahiran Kosmologi

Einstein berusaha memakai gambaran ini untuk melukiskan alam semesta secara keseluruhan. Tanpa disadarinya, dia akan menghadapi paradoks Bentley, yang dirumuskan berabad-abad sebelumnya. Pada 1920-an, mayoritas astronom percaya bahwa alam semesta itu seragam dan statis. Maka Einstein mengawalinya dengan berasumsi

alam semesta dipenuhi debu dan bintang secara seragam. Dalam satu model, alam semesta dapat disamakan dengan sebuah balon atau gelembung besar. Kita hidup di atas kulit gelembung. Bintang-bintang dan galaksi-galaksi yang kita saksikan di sekitar kita bisa disamakan dengan bintik-bintik yang tercat di permukaan balon.

Kapanpun dia mencoba memecahkan persamaannya, ternyata alam semesta menjadi dinamis; itu mengagetkannya. Einstein menghadapi persoalan sama yang diidentifikasi Bentley lebih dari 200 tahun sebelumnya. Karena gravitasi senantiasa menarik, tak pernah menolak, sekumpulan terbatas bintang-bintang semestinya kolaps ke dalam bencana yang menyala-nyala. Namun, ini kontradiktif dengan pengetahuan yang berlaku di awal abad 20, yang menyatakan alam semesta itu statis dan seragam.

Sekalipun Einstein adalah seorang revolusioner, dia tidak percaya bahwa alam semesta kemungkinan sedang bergerak. Seperti Newton dan legiun lainnya, Einstein meyakini alam semesta statis. Maka, pada 1915, Einstein terpaksa memasukkan sebuah suku baru ke dalam persamaannya, sebuah "faktor palsu" yang menghasilkan gaya baru ke dalam teorinya, gaya "antigravitasi" yang mendorong bintang-bintang berpisahan. Einstein menyebutnya "konstanta kosmologis", anak itik jelek yang sepertinya merupakan renungan susulan teori Einstein. Einstein saat itu seenaknya memilih antigravitasi ini untuk menghapuskan tarikan gravitasi, menghasilkan alam semesta statis. Dengan kata lain, alam semesta menjadi statis berdasarkan dekrit belaka: kontraksi masuk (*inward contraction*) alam semesta akibat

gravitasi dihapuskan oleh gaya keluar (*outward force*) *dark energy*. (Selama 70 tahun, gaya antigravitasi ini dianggap sebagai semacam anak yatim-piatu, sampai terjadinya penemuan beberapa tahun terakhir.)

Pada 1917, fisikawan Belanda Willem de Sitter menghasilkan solusi lain bagi teori Einstein, yaitu bahwa alam semesta adalah tak terhingga namun tanpa materi sama sekali; bahkan, ia hanya terdiri dari energi yang terkandung di ruang vakum, konstanta kosmologis. Gaya antigravitasi murni ini mencukupi untuk mendorong perluasan pesat dan eksponensial alam semesta. Tanpa materi pun, *dark energy* ini bisa menghasilkan alam semesta yang mengembang.

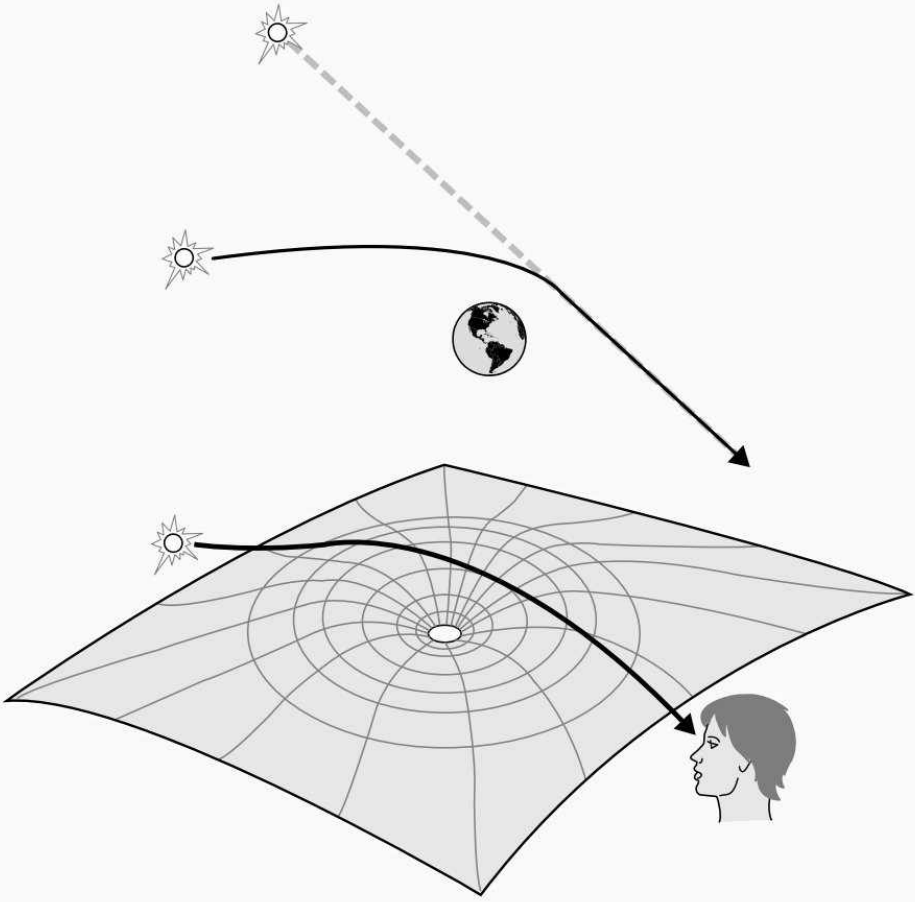
Para fisikawan kemudian dihadapkan dengan dilema. Alam semesta Einstein memiliki materi, namun tidak bergerak. Alam semesta de Sitter bergerak, namun tidak punya materi. Di alam semesta Einstein, konstanta kosmologis diperlukan untuk menetralisir tarikan gravitasi dan menghasilkan alam semesta statis. Di alam semesta de Sitter, konstanta kosmologis saja sudah cukup untuk menghasilkan alam semesta mengembang.

Akhirnya, pada 1919, saat Eropa sedang berusaha menggali jalan keluar dari reruntuhan dan pembantaian Perang Dunia I, tim-tim astronom dikirim ke seluruh dunia untuk menguji teori baru Einstein. Einstein sebelumnya mengemukakan bahwa pelengkungan ruang-waktu oleh Matahari akan cukup untuk menekuk cahaya bintang yang melintas di daerah sekitarnya. Cahaya bintang semestinya tertekuk di sekitar Matahari secara presisi dan dapat dikalkulasi, mirip dengan

cara kaca menekuk cahaya. Tapi karena kecerlangan cahaya Matahari menutupi bintang-bintang di siang hari, para ilmuwan harus menanti gerhana Matahari untuk membuat keputusan eksperimen.

Sebuah kelompok yang dipimpin astrofisikawan Inggris Arthur Eddington berlayar ke pulau Principe di Teluk Guinea lepas pantai Afrika Barat untuk merekam penekukan cahaya bintang di sekitar Matahari selama gerhana matahari berikutnya. Tim lain, dipimpin oleh Andrew Crommelin, berangkat dengan kapal layar menuju Sobral di utara Brazil. Data yang mereka kumpulkan mengindikasikan penyimpangan rata-rata cahaya bintang sebesar 1,79 busurdetik, yang mengkonfirmasi prediksi Einstein sebesar 1,74 busurdetik (di bawah marjin galat eksperimen). Dengan kata lain, cahaya memang menekuk dekat Matahari. Kelak Eddington menyebut verifikasi teori Einstein adalah momen terbesar dalam hidupnya.

Pada 6 November 1919, dalam sebuah pertemuan gabungan Royal Society dan Royal Astronomical Society di London, peraih Nobel dan presiden Royal Society, J.J. Thompson, mengatakan dengan sungguh-sungguh bahwa ini merupakan "salah satu pencapaian terbesar dalam sejarah pemikiran manusia. Ini bukan penemuan pulau terpencil, melainkan benua berisi ide-ide ilmiah baru. Ini adalah penemuan terbesar berkenaan dengan gravitasi sejak Newton mengumumkan prinsipnya."



Gambar 3: Pada 1919, dua kelompok mengkonfirmasi prediksi Einstein bahwa cahaya dari sebuah bintang jauh akan menekuk ketika melintasi Matahari. Jadi, posisi bintang tersebut akan terlihat bergeser dari posisi normalnya dengan kehadiran Matahari. Ini karena Matahari telah melengkungkan ruang-waktu di sekelilingnya. Karena itu, gravitasi tidak "menarik". Sebaliknya, ruang yang "mendorong".

(Menurut legenda, Eddington kemudian ditanya oleh seorang reporter, "Ada rumor bahwa hanya 3 orang di seluruh dunia ini yang

paham teori Einstein. Anda pasti salah satu dari mereka." Eddington berdiri terbisu, sehingga sang reporter berkata, "Jangan merendah, Eddington." Eddington mengangkat bahu, dan bilang, "Tidak, bukan begitu. Saya penasaran siapa orang yang ketiga.")

Hari berikutnya, *Times* London memasang tajuk utama menggemparkan: *"Revolusi dalam Sains—Teori Baru Alam Semesta—Gagasan Newton Digulingkan"*. Tajuk tersebut menandai momen ketika Einstein menjadi sosok tersohor, seorang pembawa pesan dari bintang-bintang.

Begitu besarnya pengumuman ini, dan begitu radikalnya penyimpangan Einstein dari Newton, sampai ikut menimbulkan reaksi buruk, saat fisikawan dan astronom terkemuka mencela teori tersebut. Di Universitas Columbia, Charles Lane Poor, seorang profesor mekanika angkasa, memimpin kritik terhadap relativitas dengan mengatakan, "Saya merasa seolah-olah sedang mengembara bersama Alice di Wonderland dan minum teh dengan Mad Hatter."

Alasan relativitas melanggar akal sehat kita bukanlah karena relativitas itu keliru, tapi karena akal sehat kita tidak mewakili realitas. *Kita* lain dari yang lain di alam semesta. Kita menghuni *real estate* tak biasa, di mana temperatur, densitas, dan kecepatan cukup ringan. Namun, di "alam semesta riil", temperatur bisa panas melepuhkan di pusat bintang-bintang, atau dingin mengebaskan di angkasa luar, dan partikel-partikel subatom yang menderu di ruang secara teratur berjalan mendekati kecepatan cahaya. Dengan kata lain, akal sehat kita berkembang di bagian alam semesta yang tak jelas dan

sangat tak biasa, Bumi; tidaklah mengejutkan jika akal sehat kita gagal memahami alam semesta sejati. Masalahnya bukan terletak pada relativitas tapi pada asumsi bahwa akal sehat kita mewakili realitas.

Masa Depan Alam Semesta

Walaupun teori Einstein berhasil menjelaskan fenomena astronomi semisal penekukan cahaya bintang di sekitar Matahari dan keterhuyungan kecil orbit planet Merkurius, prediksi kosmologisnya masih membingungkan. Banyak persoalan dijernihkan dengan hebat oleh fisikawan Rusia, Aleksandr Friedmann, yang menemukan solusi paling umum dan realistis untuk persamaan Einstein. Hari ini pun, solusi-solusi tersebut diajarkan di setiap mata pelajaran relativitas umum tingkat sarjana. (Dia menemukan solusinya pada 1922, tapi wafat pada 1925, dan karyanya sebagian besar dilupakan sampai bertahun-tahun kemudian.)

Normalnya, teori Einstein terdiri dari serangkaian persamaan luar biasa sulit yang seringkali memerlukan komputer untuk dipecahkan. Namun Friedmann berasumsi alam semesta itu dinamis, lalu dia membuat dua asumsi penyederhana (disebut prinsip kosmologis): bahwa alam semesta itu isotropik[2] (ia terlihat sama, tak peduli dari titik mana kita melihat), dan bahwa alam semesta itu homogen (ia seragam, tak peduli ke manapun Anda pergi di alam semesta).

Di bawah dua asumsi penyederhana ini, kita mendapati persamaan-persamaan tersebut runtuh. (Nyatanya, solusi Einstein

[2] Memiliki sifat fisik yang sama di semua arah—penj.

maupun de Sitter merupakan kasus khusus dari solusi umum Friedmann.) Yang luar biasa, solusi-solusinya hanya bergantung pada 3 parameter:

1. *H*, yang menentukan laju perluasan alam semesta. (Hari ini disebut konstanta Hubble, diambil dari nama astronom yang betul-betul mengukur perluasan alam semesta.)
2. *Omega*, yang mengukur densitas rata-rata materi di alam semesta.
3. *Lambda*, energi yang diasosiasikan dengan ruang hampa, atau *dark energy*.

Banyak kosmolog telah menghabiskan seluruh karir profesional mereka dengan mencoba memastikan harga akurat ketiga bilangan ini. Hubungan halus saling mempengaruhi antara tiga konstanta ini menentukan evolusi seluruh alam semesta di masa mendatang. Contoh, karena gravitasi berkontraksi, densitas Omega alam semesta bertindak sebagai semacam rem, untuk memperlambat perluasan alam semesta, membalik beberapa efek laju perluasan *big bang*. Bayangkan melempar batu ke udara. Normalnya, gravitasi cukup kuat untuk membalik arah batu tersebut, yang kemudian jatuh kembali ke Bumi. Namun, bila seseorang melemparkan batu cukup cepat, maka ia dapat melepaskan diri dari gravitasi Bumi dan membumbung tinggi ke angkasa luar untuk selama-lamanya. Seperti batu, alam semesta mulanya mengembang berkat *big bang*, tapi materi, atau Omega, bertindak sebagai rem terhadap perluasan alam semesta, sebagaimana gravitasi Bumi yang bertindak sebagai rem terhadap batu.

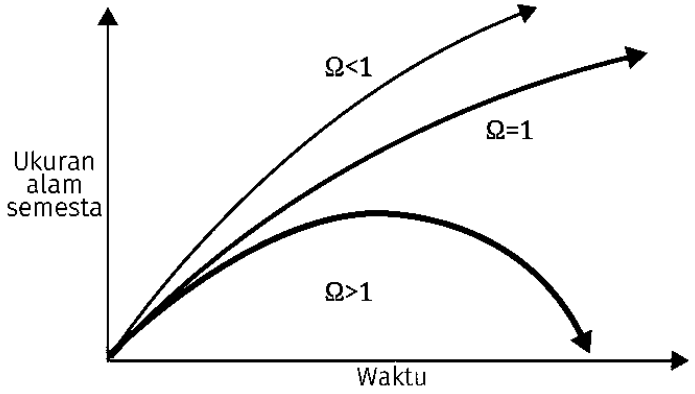
Untuk sejenak mari asumsikan bahwa Lambda, energi yang diasosiasikan dengan ruang hampa, sama dengan nol. Sedangkan Omega kita asumsikan sebagai densitas alam semesta dibagi densitas kritis. Densitas kritis alam semesta kira-kira adalah 10 atom hidrogen per meter kubik. Untuk memahami betapa hampanya alam semesta, densitas kritis alam semesta dapat disamakan dengan mendapati satu atom hidrogen dalam volume tiga bola basket.)

Jika Omega kurang dari 1, ilmuwan menyimpulkan tidak ada cukup materi di alam semesta untuk membalik perluasan orisinil dari *big bang*. (Seperti melempar batu ke udara, bila massa Bumi tidak cukup besar, batu tersebut akhirnya akan meninggalkan Bumi.) Alhasil, alam semesta akan mengembang selama-lamanya, dan akhirnya menjerumuskan alam semesta ke dalam *big freeze* sampai temperatur mendekati nol absolut. (Ini adalah prinsip di balik kulkas atau AC. Ketika gas mengembang, ia mendingin. Pada AC, misalnya, gas yang bersirkulasi di dalam pipa mengembang, mendinginkan pipa tersebut dan ruangan Anda.)

Jika Omega lebih besar dari 1, maka terdapat cukup materi dan gravitasi di alam semesta untuk membalik perluasan kosmik. Alhasil, perluasan alam semesta akan berhenti, dan alam semesta akan mulai menyusut. (Seperti batu yang dilemparkan ke udara, bila massa Bumi cukup besar, batu tersebut akhirnya akan mencapai ketinggian maksimum dan kemudian jatuh kembali ke Bumi.) Temperatur akan mulai melonjak, karena bintang-bintang dan galaksi-galaksi berlari menuju satu sama lain. (Setiap orang yang pernah memompa ban

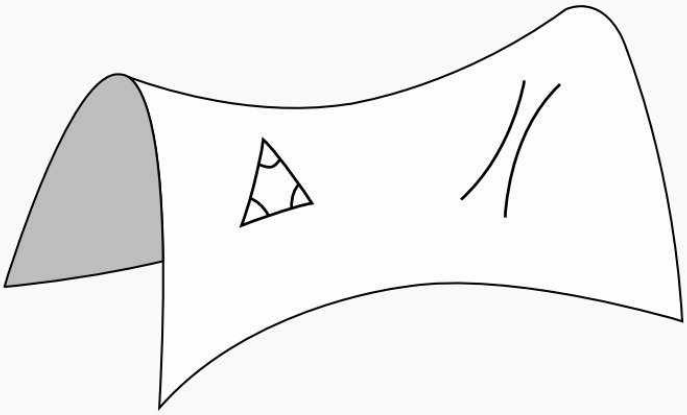
sepeda tahu bahwa pemampatan gas menghasilkan panas. Kerja mekanis pemompaan udara dikonversi menjadi energi panas. Dengan cara yang sama, alam semesta mengkonversi energi gravitasi menjadi energi panas.) Akhirnya, temperatur menjadi begitu panas sehingga semua kehidupan akan musnah, sebab alam semesta mengarah ke "*big crunch*" yang berapi-api. (Astronom Ken Croswell menamai proses ini "dari Kreasi menuju Kremasi".)

Kemungkinan ketiga adalah Omega bertengger tepat pada harga 1; dengan kata lain, densitas alam semesta sama dengan densitas kritis, di mana alam semesta melayang di antara dua ekstrim tapi tetap akan mengembang selama-lamanya. (Skenario ini, akan kita simak, disukai oleh gambaran teori inflasi.)



Gambar 4: Evolusi alam semesta memiliki tiga kemungkinan sejarah. Jika Omega kurang dari 1 (dan Lambda sama dengan 0), alam semesta akan mengembang selama-lamanya menuju *big freeze*. Jika Omega lebih besar dari 1, alam semesta akan kolaps kembali menuju *big crunch*. Jika Omega sama dengan 1, maka alam semesta adalah flat dan akan mengembang selama-lamanya. (Data satelit WMAP menunjukkan Omega plus Lambda sama dengan 1, artinya alam

semesta flat. Ini konsisten dengan teori inflasi.)

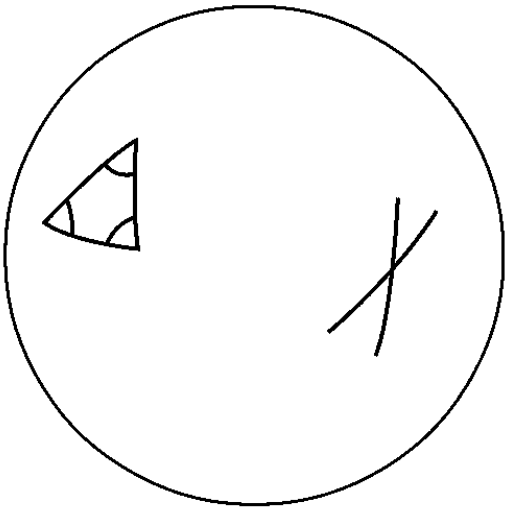


Gambar 5: Jika Omega kurang dari 1 (dan Lambda sama dengan 0), maka alam semesta adalah terbuka dan kelengkungannya negatif, seperti pada pelana. Garis-garis paralel tidak pernah bertemu, dan sudut interior segitiga berjumlah kurang dari 180 derajat.

Dan terakhir, terdapat kemungkinan bahwa alam semesta, buntut dari *big crunch*, bisa muncul kembali menuju *big bang* baru. Teori ini disebut sebagai *oscillating universe* (alam semesta berosilasi).

Friedmann memperlihatkan bahwa masing-masing skenario ini pada gilirannya menentukan kelengkungan ruang-waktu. Jika Omega kurang dari 1 dan alam semesta mengembang selamanya, Friedmann menunjukkan, bukan cuma waktu yang tak terhingga, tapi ruang juga. Alam semesta dikatakan "terbuka", yakni tak terhingga dalam hal ruang maupun waktu. Saat Friedmann mengkomputasi kelengkungan alam semesta ini, hasilnya ternyata negatif. (Ini mirip permukaan pelana atau terompet. Bila seekor kutu hidup di atas permukaan ini, ia akan mendapati garis-garis paralel tidak pernah bertemu, dan sudut

interior segitiga berjumlah kurang dari 180 derajat.)



Gambar 6: Jika Omega lebih besar dari 1, maka alam semesta adalah tertutup dan kelengkungannya positif, seperti pada bola. Garis-garis paralel senantiasa bertemu, dan sudut-sudut segitiga berjumlah lebih dari 180 derajat.

Jika Omega lebih besar dari 1, maka alam semesta akhirnya akan berkontraksi menuju *big crunch*. Ruang dan waktu adalah terhingga. Friedmann mendapati kelengkungan alam semesta ini positif (seperti bola). Terakhir, jika Omega sama dengan 1, maka ruang adalah flat, dan waktu maupun ruang tidak terbatas.

Friedmann bukan hanya menyediakan pendekatan komprehensif pertama menuju persamaan kosmologis Einstein, dia juga memberikan perkiraan paling realistis mengenai Hari Kiamat, nasib akhir alam semesta—apakah ia akan binasa dalam *big freeze*, tergoreng dalam *big crunch*, atau berosilasi selama-lamanya. Jawabannya tergantung pada parameter krusial: densitas alam semesta dan energi vakum.

Tapi gambaran Friedmann menyisakan lubang menganga. Jika alam semesta sedang mengembang, berarti ia memiliki permulaan. Teori Einstein tidak bilang apa-apa soal jenak permulaan ini. Yang luput adalah momen penciptaan, *big bang*. Dan tiga ilmuwan akhirnya memberi kita gambaran *big bang* paling memaksa.

Bab 3
Big Bang

Alam semesta tak hanya lebih ganjil dari yang kita duga, ia lebih ganjil dari yang bisa kita duga.

—J.B.S. Haldane

Apa yang kita manusia cari dalam kisah penciptaan adalah cara merasakan dunia yang akan membukakan pada kita hal-hal transenden, yang memberitahu kita dan pada saat yang sama membentuk diri kita di dalamnya. Itulah yang orang-orang inginkan. Inilah yang jiwa minta.

—Joseph Campbell

Sampul majalah *Time* pada 6 Maret 1995, yang memperlihatkan galaksi spiral besar M100, menyatakan "Kosmologi sedang balau". Kosmologi sedang terlempar ke dalam kekacauan karena data terbaru dari teleskop antariksa Hubble mengindikasikan alam semesta lebih muda dari bintang tertuanya, sebuah kemustahilan ilmiah. Data itu mengindikasikan alam semesta berumur antara 8 miliar sampai 12 miliar tahun, sementara beberapa orang percaya bahwa bintang tertua berumur 14 miliar tahun. "Anda tak mungkin lebih tua dari ibu Anda," gurau Christopher Impey dari Universitas Arizona.

Tapi sekali Anda membaca huruf cetak halusnya, Anda sadar bahwa teori *big bang* sungguh sehat. Bukti yang membantah teori *big bang* dilandaskan pada galaksi tunggal, M100, sebuah cara meragukan dalam menjalankan sains. Jalan keluarnya, sebagaimana diakui artikel tersebut, "cukup besar untuk mendorong Starship Enterprise lewat." Berdasarkan data kasar teleskop antariksa Hubble, umur alam semesta tidak mungkin dikalkulasi sampai akurasi lebih baik dari 10 hingga 20 persen.

Maksud saya, teori *big bang* tidak berlandaskan spekulasi, melainkan ratusan pokok data yang diambil dari beberapa sumber berbeda, yang masing-masingnya bertemu hingga menopang satu teori konsisten. (Dalam sains, tidak semua teori terbentuk setara. Meski seseorang bebas mengajukan versi penciptaan alam semestanya sendiri, itu harus menjelaskan ratusan pokok data yang telah kita kumpulkan yang konsisten dengan teori *big bang*.)

Tiga "bukti" hebat teori *big bang* dilandaskan pada penelitian tiga ilmuwan besar yang menguasai bidang mereka masing-masing: Edwin Hubble, George Gamow, dan Fred Hoyle.

Edwin Hubble, Astronom Ningrat

Meski fondasi teoritis kosmologi diletakkan oleh Einstein, kosmologi observasional modern hampir secara sendirian didirikan oleh Edwin Hubble, barangkali boleh disebut astronom terpenting abad 20.

Lahir pada 1889 di pedusunan Marshfield, Missouri, Hubble adalah anak desa rendah hati berambisi tinggi. Ayahnya, seorang pengacara

dan agen asuransi, mendesaknya mengejar karir dalam bidang hukum. Namun Hubble terpikat oleh buku-buku Jules Verne dan terpesona oleh bintang-bintang. Dia melahap buku-buku sains fiksi klasik seperti *Twenty Thousand League Under the Sea* dan *From the Earth to the Moon*. Dia juga petinju ulung; para promotor ingin dia beralih ke profesional dan melawan juara kelas berat dunia, Jack Johnson.

Dia meraih beasiswa prestisius Rhodes untuk belajar hukum di Oxford, di mana dia mulai mengadopsi perangai masyarakat kelas atas Inggris. (Dia mulai mengenakan setelan *tweed*, mengisap pipa cerutu, memakai aksen Inggris terhormat, dan membicarakan luka duelnya, yang dirumorkan dibuat sendiri.)

Namun Hubble tidak bahagia. Yang betul-betul memotivasinya bukanlah pelanggaran dan perkara hukum; romansanya adalah bersama bintang-bintang, yang telah berawal sejak kecil. Dengan berani dia beralih profesi dan menuju Universitas Chicago dan observatorium di Mount Wilson, California, yang kala itu menyimpan teleskop terbesar di Bumi, dengan cermin 100 inchi. Terlambat memulai karir, Hubble bertindak cepat. Untuk mengejar waktu yang hilang itu, dia bermaksud cepat-cepat menjawab beberapa misteri terdalam dan paling abadi dalam astronomi.

Pada 1920-an, alam semesta adalah tempat yang nyaman; diyakini luas bahwa keseluruhan alam semesta hanya terdiri dari galaksi Bima Sakti, petak cahaya berkabut yang membentang di langit malam menyerupai susu tumpah. (Kata "galaksi", nyatanya, berasal dari kata

Yunani untuk susu.) Pada 1920, "Debat Hebat" terjadi antara astronom Harlow Shapley dari Harvard dan Heber Curtis dari Lick Observatory. Bertajuk *"The Scale of the Universe"*, ini menyangkut ukuran galaksi Bima Sakti dan alam semesta itu sendiri. Shapley mengambil posisi bahwa Bima Sakti menyusun keseluruhan alam semesta tampak. Curtis yakin di luar Bima Sakti terdapat "nebula spiral", gumpalan kabut berputar yang aneh namun menawan. (Sejak 1700-an, filsuf Immanuel Kant telah berspekulasi bahwa nebula-nebula ini ialah "pulau alam semesta".)

Hubble tergugah oleh debat itu. Persoalan kuncinya adalah bahwa penetapan jarak ke bintang merupakan (dan masih tetap) salah satu tugas paling sulit dalam astronomi. Bintang cerlang yang sangat jauh bisa terlihat identik dengan bintang redup yang dekat. Kebingungan ini menjadi sumber banyak perseteruan dan kontroversi hebat dalam astronomi. Hubble butuh "lilin standar", sebuah objek yang memancarkan besaran cahaya yang sama di setiap tempat di alam semesta, untuk memecahkan masalah tersebut. (Nyatanya, sebagian besar upaya dalam kosmologi sampai hari ini terdiri dari upaya menemukan dan mengkalibrasi lilin standar demikian. Banyak perdebatan hebat dalam astronomi berpusat pada seberapa handal lilin-lilin standar ini.) Bila kita punya lilin standar yang menyala secara seragam dengan intensitas yang sama di sepanjang alam semesta, maka bintang yang 4 kali lebih redup dari bintang normal adalah 2 kali lebih jauh dari Bumi.

Suatu malam, saat menganalisa foto nebula spiral Andromeda,

Hubble mendapat momen *eureka* (penemuan). Yang dia temukan di dalam Andromeda ialah tipe bintang variabel (disebut Cepheid) yang sudah dipelajari oleh Henrietta Leavitt. Diketahui bahwa bintang ini secara teratur tumbuh dan meredup seiring waktu, dan waktu untuk satu siklus lengkap berkorelasi dengan kecerlangannya. Semakin cerlang bintang tersebut, semakin panjang siklus denyutannya. Jadi, cukup dengan mengukur panjang siklus ini, kita dapat mengkalibrasi kecerlangannya dan kemudian menetapkan jaraknya. Hubble mendapati bintang itu memiliki periode 31,4 hari, yang, sangat mengejutkan dirinya, diterjemahkan menjadi jarak sejuta tahun-cahaya, jauh di luar galaksi Bima Sakti. (Cakram berkilau Bima Sakti hanya berdiameter 100.000 tahun-cahaya. Kalkulasi berikutnya akan menunjukkan ternyata Hubble mengestimasi jarak sejati ke Andromeda terlalu rendah, yang kenyataannya lebih mendekati 2 juta tahun-cahaya.)

Ketika melakukan eksperimen yang sama terhadap nebula-nebula spiral lain, Hubble mendapati mereka juga berada di luar galaksi Bima Sakti. Dengan kata lain, sudah jelas baginya bahwa nebula-nebula spiral ini merupakan pulau-pulau alam semesta—bahwa galaksi Bima Sakti hanyalah sebuah galaksi di cakrawala galaksi.

Dalam satu pukulan, ukuran alam semesta menjadi jauh lebih besar. Dari satu galaksi, alam semesta mendadak dihuni jutaan, barangkali miliaran, galaksi saudara. Dari alam semesta berdiameter 100.000 tahun-cahaya, tiba-tiba menjadi alam semesta dengan diameter mungkin miliaran tahun-cahaya.

Penemuan itu saja sudah memastikan satu tempat bagi Hubble di kuil para astronom. Tapi dia pun melebihi penemuan itu. Bukan hanya bertekad menemukan jarak ke galaksi-galaksi, dia juga ingin mengkalkulasi seberapa cepat mereka bergerak.

Efek Doppler dan Alam Semesta yang Mengembang

Hubble tahu, cara paling sederhana untuk mengkalkulasi kecepatan objek-objek jauh ialah dengan menganalisa perubahan suara atau cahaya yang mereka pancarkan, atau dikenal sebagai Efek Doppler. Mobil mengeluarkan suara ini saat melewati kita di jalan raya. Polisi memanfaatkan efek Doppler untuk mengkalkulasi kecepatan Anda; mereka menyorotkan sinar laser ke mobil Anda, yang memantul kembali ke mobil polisi. Dengan menganalisa ingsutan frekuensi sinar laser, polisi dapat mengkalkulasi kecepatan Anda.

Bila sebuah bintang, contohnya, bergerak ke arah Anda, gelombang cahaya yang ia pancarkan akan terperas seperti akordeon. Alhasil, panjang gelombangnya menjadi lebih pendek. Sebuah bintang kuning akan terlihat sedikit kebiru-biruan (sebab warna biru memiliki panjang gelombang lebih pendek daripada kuning). Serupa halnya, bila sebuah bintang bergerak menjauhi Anda, gelombang cahayanya akan teregang, memberinya panjang gelombang lebih panjang, sehingga bintang kuning terlihat sedikit kemerah-merahan. Semakin besar distorsinya, semakin besar kecepatan bintang tersebut. Dengan demikian, jika kita mengetahui ingsutan frekuensi cahaya bintang, kita dapat menentukan kecepatan bintang tersebut.

Pada 1912, astronom Vesto Slipher telah menemukan bahwa galaksi-galaksi sedang menjauhi Bumi pada kecepatan tinggi. Alam semesta tak hanya lebih besar dari yang sebelumnya diperkirakan, ia juga mengembang dan pada kecepatan tinggi pula. Selain fluktuasi-fluktuasi kecil, dia mendapati galaksi-galaksi menampilkan ingsutan merah (*redshift*), disebabkan oleh galaksi-galaksi yang bergerak menjauhi kita, ketimbang ingsutan biru (*blueshift*). Temuan Slipher menunjukkan alam semesta memang dinamis dan tidak statis, sebagaimana yang diasumsikan Newton dan Einstein.

Selama berabad-abad mempelajari paradoks Bentley dan Olbers, tak pernah ada ilmuwan yang serius mempertimbangkan kemungkinan bahwa alam semesta mengembang. Pada 1928, Hubble melakukan perjalanan menentukan ke Belanda untuk bertemu dengan Willem de Sitter. Yang membuat Hubble penasaran adalah prediksi de Sitter bahwa semakin jauh sebuah galaksi berada, semakin cepat semestinya ia bergerak. Bayangkan balon yang mengembang, dengan galaksi-galaksi di permukaannya. Seraya balon mengembang, galaksi-galaksi yang saling berdekatan bergerak memisah relatif lambat. Semakin mereka berdekatan, semakin lambat mereka berpisah. Tapi galaksi-galaksi yang terpisah lebih jauh di permukaan balon, bergerak memisah lebih cepat.

De Sitter mendesak Hubble untuk mencari efek ini dalam datanya, yang dapat diverifikasi dengan menganalisa ingsutan merah galaksi-galaksi. Semakin besar ingsutan merah sebuah galaksi, semakin cepat ia bergerak menjauh, dan karenanya semakin jauh ia berada.

(Menurut teori Einstein, ingsutan merah sebuah galaksi secara teknis bukan disebabkan oleh mencepat dan menjauhnya ia dari Bumi; melainkan disebabkan oleh perluasan ruang antara galaksi dan Bumi itu sendiri. Sumber ingsutan merah tersebut adalah cahaya dari galaksi jauh yang teregangkan atau terpanjangkan oleh perluasan ruang, dan karenanya tampak kemerahan.)

Hukum Hubble

Begitu kembali ke California, Hubble menunaikan nasehat de Sitter dan mencari bukti efek ini. Dengan menganalisa 24 galaksi, dia menemukan bahwa semakin jauh galaksi berada, semakin cepat ia bergerak menjauhi Bumi, persis sebagaimana prediksi persamaan Einstein. Rasio antara keduanya (kecepatan dibagi jarak) kira-kira konstan. Itu segera dikenal sebagai konstanta Hubble, atau *H*. Barang-kali ini merupakan konstanta terpenting dalam seluruh kosmologi, sebab konstanta Hubble memberitahu Anda laju perluasan alam semesta.

Jika alam semesta mengembang, renung para ilmuwan, maka mungkin ia juga mempunyai permulaan. Pembalikan konstanta Hubble bahkan memberikan kalkulasi kasar umur alam semesta. Bayangkan video rekaman sebuah ledakan. Dalam video rekaman tersebut kita melihat puing-puing meninggalkan lokasi ledakan dan kita bisa mengkalkulasi kecepatan perluasan. Tapi ini juga berarti kita dapat memutar mundur video rekaman, sampai semua puing berkumpul menjadi satu titik tunggal. Karena kita tahu kecepatan

perluasan, secara kasar kita dapat bekerja mundur dan mengkalkulasi waktu terjadinya ledakan.

(Estimasi awal Hubble menetapkan umur alam semesta sekitar 1,8 miliar tahun, yang memusingkan bergenerasi-generasi kosmolog lantaran lebih muda dari asumsi umur Bumi dan bintang-bintang. Bertahun-tahun kemudian para astronom menyadari bahwa galat dalam pengukuran cahaya dari variabel Cepheid di Andromeda telah menghasilkan harga konstanta Hubble yang salah. Faktanya, "perang Hubble" menyangkut harga akurat konstanta Hubble telah berkecamuk selama 70 tahun terakhir. Angka paling definitif hari ini datang dari satelit WMAP.)

Pada 1931, dalam kunjungan kemenangan ke Mount Wilson Observatory, Einstein pertama-tama menemui Hubble. Menyadari alam semesta memang sedang mengembang, dia sebut konstanta kosmologisnya sebagai "blunder terbesar". (Bagaimanapun, blunder Einstein pun cukup untuk menggoncang fondasi kosmologi, sebagaimana akan kita simak dalam pembahasan data satelit WMAP di bab berikutnya.) Saat dibawa melihat-lihat observatorium besar tersebut, isteri Einstein diberitahu bahwa teleskop raksasa itu menentukan bentuk akhir alam semesta. Nyonya Einstein menjawab acuh tak acuh, "Suamiku melakukannya di atas sandaran amplop tua."

Big Bang

Seorang pendeta Belgia, Georges Lemaître, yang mendengar perihal teori Einstein, terpesona oleh ide bahwa teori tersebut secara logika

membawa pada alam semesta yang mengembang dan karenanya mempunyai permulaan. Karena gas memanas selagi dimampatkan, dia sadar alam semesta di permulaan masa pasti luar biasa panas. Pada 1927, dia menyatakan alam semesta bermula sebagai "superatom" bertemperatur dan berdensitas luar biasa, yang mendadak meledak keluar, melahirkan alam semesta mengembang Hubble. Dia menulis, "Evolusi dunia bisa disamakan dengan pertunjukan kembang api yang baru berakhir: beberapa gumpalan merah, abu, dan asap. Berdiri di atas bara api yang sudah dingin, kita melihat memudarnya matahari-matahari secara perlahan, dan kita mencoba mengingat kecerlangan sumber planet-planet yang telah menghilang."

(Orang pertama yang mengajukan ide "superatom" di permulaan masa ini adalah, lagi-lagi, Edgar Allan Poe. Dia berargumen, materi menarik bentuk-bentuk materi lain, oleh karenanya di permulaan masa pasti terdapat konsentrasi kosmik atom-atom.)

Lemaître menghadiri konferensi fisika dan mengusik ilmuwan lain dengan idenya. Mereka mendengarkannya dengan senang lalu diam-diam menolak idenya. Arthur Eddington, salah seorang fisikawan terkemuka di masanya, berkata, "Sebagai seorang ilmuwan, saya hanya tak percaya bahwa tatanan saat ini diawali dengan dentuman... Gagasan permulaan mendadak pada tatanan Alam masa kini adalah menjijikkan bagi saya."

Tapi, dari tahun ke tahun, kegigihannya berangsur-angsur mengalahkan resistensi komunitas ilmiah. Ilmuwan yang menjadi juru bicara dan pempopuler terpenting teori *big bang* itu akhirnya

menyediakan bukti paling meyakinkan akan teori tersebut.

George Gamow, Pelawak Kosmik

Sementara Hubble menjadi ningrat astronomi, penelitiannya dilanjutkan oleh sosok besar lain, George Gamow. Gamow dalam banyak hal berkebalikan dengannya: seorang pelawak, kartunis, terkenal akan lelucon praktis dan 20 buku sains, banyak yang diperuntukkan bagi orang dewasa muda. Beberapa generasi fisikawan (termasuk saya) dibesarkan dengan buku-bukunya yang informatif dan menghibur perihal fisika dan kosmologi. Pada masa ketika relativitas dan teori quantum sedang merevolusi sains dan masyarakat, buku-bukunya bertahan sendirian: satu-satunya buku kredibel mengenai sains tingkat lanjut yang tersedia bagi remaja.

Sementara segelintir ilmuwan sering mandul ide, puas menggali tumpukan data kering, Gamow merupakan salah satu jenius kreatif di masanya, seorang polimatik yang cepat menelurkan ide-ide yang kelak mengubah arah fisika nuklir, kosmologi, dan bahkan penelitian DNA. Barangkali bukanlah kebetulan jika otobiografi James Watson, yang bersama Francis Crick mengurai rahasia molekul DNA, diberi judul *Genes, Gamow, and Girls*. Sebagaimana dikenang koleganya, Edward Teller, "90 persen teori Gamow salah, dan mudah untuk mengenali bahwa teori-teori tersebut salah. Tapi dia tidak risau. Dia salah satu dari orang-orang yang tak punya kebanggaan khusus atas temuan-temuannya. Dia lontarkan begitu saja ide terbarunya dan lantas menganggapnya lelucon." Tapi sisa 10 persen idenya berjalan terus

untuk mengubah seluruh bidang ilmiah.

Gamow dilahirkan di Odessa, Rusia, pada 1904, di masa awal pergolakan sosial negeri itu. Gamow mengenang, "pelajaran seringkali ditunda saat Odessa dibombardir oleh kapal perang musuh, atau saat pasukan ekspedisi Yunani, Prancis, dan Inggris melancarkan serangan bayonet di sepanjang jalanan utama kota terhadap pasukan Putih, Merah, atau bahkan Hijau Rusia yang berbenteng parit, atau saat pasukan Rusia dari warna berbeda-beda saling bertempur."

Titik balik di awal kehidupannya terjadi saat dia pergi ke gereja dan diam-diam membawa pulang beberapa roti komuni usai pelayanan. Memeriksa dengan sebuah mikroskop, dia tak lihat perbedaan antara roti komuni, yang melambangkan daging Yesus Kristus, dan roti biasa. Dia berkesimpulan, "Saya pikir inilah eksperimen yang menjadikan saya ilmuwan."

Dia dididik di Universitas Leningrad dan belajar di bawah fisikawan Aleksandr Friedmann. Selanjutnya, di Universitas Copenhagen, dia bertemu banyak raksasa fisika, seperti Niels Bohr. (Pada 1932, dia beserta isteri mencoba meninggalkan Uni Soviet dengan melayari rakit dari Crimean ke Turki namun gagal. Berikutnya, dia berhasil meninggalkan Uni Soviet saat menghadiri konferensi fisika di Brussels, yang membuatnya dijatuhi hukuman mati dari Soviet.)

Gamow terkenal suka mengirim pantun jenaka kepada teman-temannya. Kebanyakan tidak bisa dicetak, tapi salah satu pantun menangkap kegelisahan yang dirasakan para kosmolog saat menghadapi besarnya angka-angka astronomi dan melihat jelas

ketakterhinggaan:

Ada seorang kawan muda dari Trinitas
yang menerima akar kuadrat tak terbatas
Tapi jumlah digit
membuatnya sakit;
Matematika dia buang, Ilahiah dia pungut tuntas.

Pada 1920-an, di Rusia, Gamow mencetak sukses besar pertamanya ketika memecahkan misteri kenapa peluruhan radioaktif dapat terjadi. Berkat penelitian Madame Curie dan lainnya, para ilmuwan tahu bahwa atom uranium tidak stabil dan memancarkan radiasi dalam bentuk sinar alfa (nukleus atom helium). Tapi menurut mekanika Newtonian, gaya nuklir misterius yang menjaga kesatuan nukleus semestinya menjadi penghalang yang mencegah kebocoran ini. Bagaimana ini bisa terjadi?

Gamow (dan R.W. Gurney dan E.U. Condon) sadar bahwa peluruhan radioaktif adalah memungkinkan, sebab dalam teori quantum, prinsip ketidakpastian mengindikasikan kita tak pernah tahu persis lokasi dan kecepatan sebuah partikel; oleh karenanya terdapat probabilitas kecil ia dapat "menerowongi" atau menembus sebuah penghalang. (Hari ini, ide penerowongan ini menjadi pusat seluruh ilmu fisika dan dipakai untuk menjelaskan atribut-atribut perangkat elektronik, *black hole*, dan *big bang*. Alam semesta sendiri mungkin diciptakan melalui penerowongan.)

Melalui analogi, Gamow membayangkan seorang tahanan di dalam bui, dikelilingi dinding besar penjara. Di dunia klasik Newtonian,

kabur adalah mustahil. Tapi di dunia aneh teori quantum, Anda tak tahu persis di titik mana tahanan tersebut berada atau kecepatannya. Jika tahanan cukup sering memukul dinding penjara, Anda dapat mengkalkulasi peluang bahwa suatu hari dia akan pergi lewat situ, melanggar akal sehat dan mekanika Newtonian. Terdapat probabilitas terhingga dan bisa dikalkulasi bahwa dia akan ditemukan di luar gerbang dinding penjara. Untuk objek besar seperti tahanan, Anda harus menunggu lebih lama dari umur alam semesta untuk terjadinya peristiwa ajaib ini. Tapi untuk partikel alfa dan partikel subatom, itu terjadi sepanjang waktu, sebab partikel-partikel tersebut menghantam dinding nukleus berulang-ulang dengan energi dalam jumlah besar. Banyak pihak merasa semestinya Gamow diberi Hadiah Nobel atas penelitian amat penting ini.

Pada 1940-an, minat Gamow mulai bergeser dari relativitas ke kosmologi, yang dia pandang sebagai negeri kaya yang belum diketemukan. Yang baru diketahui pada masa itu tentang alam semesta adalah bahwa langit hitam dan alam semesta mengembang. Gamow dipandu oleh satu ide: menemukan bukti atau "fosil" yang membuktikan adanya *big bang* miliaran tahun lampau. Ini sangat membuat frustasi, sebab kosmologi bukanlah sains eksperimental dalam pengertian sesungguhnya. Tak ada eksperimen yang bisa seseorang lakukan dengan *big bang*. Kosmologi lebih mirip cerita detektif, sains observasional di mana Anda mencari "relik" atau bukti di tempat terjadinya kejahatan, ketimbang sains eksperimental di mana Anda bisa melakukan eksperimen presisi.

Dapur Nuklir Alam Semesta

Kontribusi besar Gamow berikutnya untuk sains adalah temuan reaksi nuklir yang melahirkan unsur teringan di alam semesta. Dia senang menyebutnya "dapur prasejarah alam semesta", di mana semua unsur alam semesta mulanya dimasak oleh panas hebat *big bang*. Hari ini, proses ini disebut "nukleosintesis", atau pengkalkulasian keberlimpahan relatif unsur-unsur di alam semesta. Ide Gamow adalah bahwa terdapat sebuah rantai tak terputus, dimulai dari hidrogen, yang bisa dibangun dengan menambahkan lebih banyak partikel pada atom hidrogen secara berturut-turut. Seluruh tabel periodik unsur kimiawi Mendeleev, dia yakin, bisa dibuat dari panas *big bang*.

Gamow dan mahasiswanya beralasan, karena alam semesta merupakan kumpulan panas proton dan neutron di jenak penciptaan, maka mungkin terjadi fusi, di mana atom-atom hidrogen berfusi untuk menghasilkan atom helium. Sebagaimana pada bom hidrogen atau bintang, temperaturnya begitu panas sehingga proton-proton sebuah atom hidrogen saling bertubrukan sampai mereka bergabung, menciptakan nukleus helium. Tubrukan berikutnya antara hidrogen dan helium akan, menurut skenario ini, menghasilkan unsur-unsur berikutnya, mencakup litium dan berilium. Gamow berasumsi, unsur-unsur lebih tinggi dapat dibangun secara berurutan dengan menambahkan lebih banyak partikel subatom pada nukleus—dengan kata lain, keseratus unsur atau lebih yang menyusun alam semesta tampak dahulunya "dimasak" dalam panas bola api awal yang menyala-nyala.

Dengan gaya khas, Gamow meletakkan garis besar program ambisius ini dan membiarkan mahasiswa Ph.D.-nya, Ralph Alpher, melengkapi detilnya. Saat makalah tersebut selesai, dia tak tahan untuk membuat lelucon praktisnya. Dia taruh nama fisikawan Hans Bethe pada makalah tersebut tanpa seizinnya, dan itu menjadi makalah alfa-beta-gamma yang terkenal.

Gamow menemukan bahwa *big bang* memang cukup panas untuk menghasilkan helium, yang menyusun sekitar 25% alam semesta, berdasarkan massa. Bekerja kebalikannya, satu "bukti" *big bang* dapat ditemukan dengan cukup menatap banyak bintang dan galaksi hari ini dan mendapati mereka tersusun dari kira-kira 75% hidrogen, 25% helium, dan beberapa unsur bekas. (Sebagaimana dikatakan David Spergel, astrofisikawan di Princeton, "Setiap kali membeli balon, Anda memperoleh atom-atom [yang sebagiannya] terbentuk pada beberapa menit pertama *big bang*.")

Namun, Gamow juga menemukan masalah dengan kalkulasi ini. Teorinya bekerja dengan baik pada unsur-unsur amat ringan. Tapi unsur-unsur dengan 5 neutron dan 8 proton sangat tidak stabil dan karenanya tidak bertindak sebagai "jembatan" untuk menghasilkan unsur-unsur yang mempunyai jumlah proton dan neutron lebih besar. Jembatan terhanyut pada 5 dan 8 partikel. Karena alam semesta tersusun dari unsur-unsur berat dengan neutron dan proton lebih dari 5 dan 8, ini menyisakan misteri kosmik. Kegagalan program Gamow untuk mengulur melewati celah 5-partikel dan 8-partikel tetap menjadi masalah bandel selama bertahun-tahun, menggagalkan visinya untuk

membuktikan bahwa semua unsur alam semesta terbentuk pada momen *big bang*.

Radiasi Gelombang Mikro Latar

Pada waktu yang sama, satu ide lain menggugahnya: bila *big bang* demikian panas luar biasa, mungkin sebagian residu panasnya masih menyebar di alam semesta hari ini. Jika demikian, itu akan memberi "catatan fosil" *big bang* sendiri. Mungkin *big bang* begitu kolosal sampai-sampai goncangan susulannya masih memenuhi alam semesta dengan kabut radiasi seragam.

Pada 1946, Gamow mengasumsikan *big bang* berawal dengan inti superpanas neutron. Ini asumsi yang beralasan, sebab sedikit sekali yang diketahui tentang partikel subatom selain elektron, proton, dan neutron. Jika bisa mengestimasi temperatur bola neutron ini, dia sadar dirinya dapat mengkalkulasi jumlah dan sifat radiasi yang dipancarkannya. Dua tahun kemudian Gamow menunjukkan bahwa radiasi yang dilepaskan oleh inti superpanas ini akan beraksi seperti "radiasi benda hitam" (*black body radiation*). Ini tipe radiasi amat spesifik yang dilepaskan objek panas; ia menyerap semua cahaya yang mengenainya, memancarkan balik radiasi dengan cara yang khas. Contoh, Matahari, lava leleh, batu bara panas dalam api, dan keramik panas dalam oven, semuanya berpijar kuning-merah dan memancarkan radiasi benda hitam. (Radiasi benda hitam pertama kali ditemukan oleh pembuat porselen ternama, Thomas Wedgwood, pada 1972. Dia memperhatikan, ketika bahan-bahan mentah dibakar dalam oven-nya,

mereka berubah warna dari merah menjadi kuning kemudian putih, seraya temperatur dinaikkan.)

Ini penting karena begitu kita tahu warna sebuah objek panas, kita juga akan tahu temperatur kira-kiranya, dan sebaliknya; rumusan akurat menyangkut temperatur objek panas dan radiasi yang dipancarkannya pertama kali didapat oleh Max Planck pada 1900, yang mengarah pada lahirnya teori quantum. (Bahkan ini menjadi cara ilmuwan menetapkan temperatur Matahari. Matahari memancarkan utamanya cahaya kuning, yang pada gilirannya ekuivalen dengan temperatur benda hitam sebesar kira-kira 6.000 K. Demikianlah kita mengetahui temperatur atmosfer luar Matahari. Sama halnya, bintang raksasa merah Betelgeuse mempunyai temperatur permukaan 3.000 K, suhu benda hitam yang ekuivalen dengan warna merah, yang juga dipancarkan oleh sekeping batu bara panas.)

Makalah tahun 1948 milik Gamow adalah yang pertama kali mengisyaratkan bahwa radiasi *big bang* mungkin memiliki karakteristik spesifik—radiasi benda hitam. Karakteristik terpenting radiasi benda hitam adalah suhunya. Selanjutnya, Gamow harus menghitung suhu radiasi benda hitam saat ini.

Mahasiswa Ph.D. Gamow, Ralph Alpher, dan seorang mahasiswa lain, Robert Herman, mencoba menyelesaikan kalkulasi Gamow dengan menghitung suhunya. Gamow menulis, "Meramaikan kemungkinan dari hari-hari awal alam semesta sampai masa sekarang, kami menemukan bahwa selama periode panjang yang telah berlalu, alam semesta pasti telah mendingin jadi sekitar 5 derajat di

atas suhu mutlak."

Pada 1948, Alpher dan Herman mempublikasikan sebuah makalah yang memberikan argumen detil mengapa suhu pijaran susulan *big bang* hari ini mesti 5 derajat di atas nol mutlak (estimasi mereka luar biasa mendekati suhu tepat yang kini kita tahu sebesar 2,7 derajat di atas nol). Radiasi ini, yang mereka identifikasi ada dalam kisaran gelombang mikro, semestinya masih beredar di alam semesta hari ini, kata postulat mereka, memenuhi kosmos dengan pijaran susulan seragam.

(Pemikiran mereka adalah sebagai berikut. Selama bertahun-tahun pasca *big bang,* suhu alam semesta begitu panas sehingga setiap kali atom terbentuk, ia akan terkoyak; karenanya ada banyak elektron bebas yang dapat menghamburkan cahaya. Dengan demikian, alam semesta saat itu buram, bukan transparan. Sorot cahaya yang bergerak di alam semesta superpanas ini akan terserap setelah menempuh jarak pendek, sehingga alam semesta terlihat berawan. Namun, setelah 380.000 tahun, suhu turun menjadi 3.000 derajat. Di bawah suhu tersebut, atom-atom tak lagi terkoyak oleh tubrukan. Alhasil, atom-atom stabil dapat terbentuk, dan sorot cahaya kini bisa berjalan selama bertahun-tahun-cahaya tanpa diserap. Maka, untuk pertama kalinya, ruang hampa menjadi transparan. Radiasi ini, yang tak lagi diserap seketika setelah terbentuk, sedang menyebar di alam semesta hari ini.)

Saat Alpher dan Herman memperlihatkan kalkulasi final mereka atas suhu alam semesta, Gamow kecewa. Suhu tersebut begitu dingin,

jadi akan sulit sekali untuk diukur. Perlu setahun bagi Gamow untuk akhirnya setuju bahwa detil kalkulasi mereka benar. Tapi dia putus asa apakah akan sanggup mengukur medan radiasi sesayup itu. Instrumen yang tersedia pada tahun 1940-an tidak mampu mengukur gema sayup ini. (Dalam kalkulasi berikutnya, memakai asumsi yang salah, Gamow mendorong suhu radiasi naik sampai 50 derajat.)

Mereka mengadakan serangkaian ceramah untuk mempublikasikan penelitian mereka. Tapi sayangnya hasil ramalan mereka diabaikan. Alpher berkata, "Kami curahkan banyak energi untuk mengadakan ceramah soal penelitian kami. Tak seorangpun menanggapi; tak seorangpun mengatakan itu bisa diukur... Jadi selama periode 1948 sampai 1955, kami agak menyerah."

Tak gentar, Gamow, lewat buku-buku dan kuliahnya, menjadi tokoh utama yang mendorong teori *big bang*. Tapi dia bertemu lawan sengit dan sepadan. Sementara Gamow dapat mempesonakan audiens dengan lelucon dan kejenakaan nakalnya, Fred Hoyle dapat menundukkan audiens dengan kebrilianan dan keberanian agresifnya.

Fred Hoyle, Sang Penentang

Radiasi gelombang mikro latar memberi kita "bukti kedua" *big bang*. Tapi orang paling tidak mungkin untuk menyediakan bukti besar ketiga *big bang* via nukleosintesis adalah Fred Hoyle, seorang pria yang ironisnya menghabiskan hampir seluruh kehidupan profesionalnya untuk menyangkal teori *big bang*.

Hoyle adalah personifikasi orang yang tidak cocok untuk akademik,

penentang brilian yang berani menantang kearifan konvensional dengan gayanya yang terkadang suka berkelahi. Sementara Hubble merupakan ningrat luhur, menyamai perangai seorang *don* Oxford, dan Gamow merupakan pelawak dan polimatik yang dapat menyilaukan audiens dengan gurauan, pantun jenaka, dan kelakarnya, gaya Hoyle menyerupai anjing kasar; dia terlihat janggal di aula kuno Universitas Cambridge, tempat lama Isaac Newton.

Hoyle dilahirkan pada 1915 di utara Inggris, putera seorang pedagang tekstil, di sebuah kawasan yang didominasi industri wol. Semasa kecil dia tergugah oleh sains; radio baru saja masuk ke desanya, dan, kenangnya, 20 sampai 30 orang antusias memasangi rumah dengan penerima radio. Tapi titik balik dalam kehidupannya datang ketika orangtuanya menghadiahkan teleskop.

Gaya tempur Hoyle dimulai sejak kanak-kanak. Dia telah menguasai tabel perkalian di usia 3 tahun, dan kala itu gurunya memintanya mempelajari angka Romawi. "Bagaimana seseorang bisa begitu gila menulis VIII untuk 8?" kenangnya mengejek. Tapi saat diberitahu bahwa undang-undang mengharuskannya bersekolah, dia menulis, "Saya simpulkan bahwa, sialnya, saya terlahir ke dunia yang didominasi monster mengamuk yang serba kuasa dan serba bodoh bernama 'undang-undang'."

Peremehannya terhadap otoritas juga diperkokoh oleh pertengkaran dengan seorang guru lain, yang berkata kepada murid-murid bahwa bunga tertentu memiliki lima daun bunga. Membuktikan gurunya salah, dia membawa bunga berdaun enam ke kelas. Atas

tindakan pembangkangan lancang ini sang guru memukul keras kuping kirinya. (Hoyle kelak jadi tuli pada kuping tersebut.)

Teori Steady State

Pada 1940-an, Hoyle tidak terpikat oleh teori *big bang*. Cacat dalam teori tersebut adalah bahwa Hubble, akibat galat dalam pengukuran cahaya dari galaksi-galaksi jauh, telah keliru mengkalkulasi umur alam semesta menjadi 1,8 miliar tahun. Geolog menegaskan umur Bumi dan tata surya bermiliar-miliar tahun. Bagaimana mungkin alam semesta lebih muda daripada planet-planetnya?

Bersama kolega, Thomas Gold dan Hermann Bondi, Hoyle bermaksud membangun saingan bagi teori tersebut. Legenda menyebut, teori mereka, *steady state theory*, terinspirasi oleh film hantu tahun 1945 berjudul *Dead of Night*, dibintangi Michael Redgrave. Film ini terdiri dari serangkaian cerita hantu, tapi di adegan akhir terdapat perkembangan mengesankan: film berakhir persis sebagaimana ia berawal. Dengan demikian, film tersebut bersifat sirkuler, tanpa awal atau akhir. Ini diduga mengilhami ketiganya untuk mengajukan teori alam semesta yang juga tidak mempunyai awal ataupun akhir. (Gold kemudian mengklarifikasi kisah ini. Dia mengenang, "Saya pikir kami nonton film tersebut beberapa bulan sebelumnya, dan saat mengusulkan teori *steady state*, saya bilang pada mereka, 'Bukankah ini agak mirip *Dead of Night*?'")

Menurut model ini, porsi-porsi alam semesta sedang mengembang, tapi materi baru terus-menerus terbentuk dari kenihilan, sehingga

densitas alam semesta tetap sama. Walaupun dia tak bisa memberi detil-detil bagaimana materi muncul misterius entah dari mana, teori tersebut segera menarik sekawanan loyalis yang melawan para teoris *big bang*. Bagi Hoyle, tidak logis rasanya jika malapetaka yang menyala-nyala muncul entah dari mana hingga meluncurkan galaksi-galaksi ke segala arah; dia lebih suka pembentukan massa secara halus dari kenihilan. Dengan kata lain, alam semesta itu tidak berwaktu. Ia tidak mempunyai akhir, ataupun awal. Ia ada begitu saja.

(Kontroversi *steady state-big bang* mirip dengan kontroversi yang mempengaruhi geologi dan ilmu lainnya. Dalam geologi, terdapat perdebatan abadi antara *uniformitarianism* [keyakinan bahwa Bumi terbentuk melalui perubahan bertahap di masa lalu] dan *catastrophism* [yang mempostulatkan bahwa perubahan terjadi melalui peristiwa kasar]. Walaupun *uniformitarianism* masih menjelaskan banyak fitur geologis dan ekologis Bumi, kini tak seorangpun dapat membantah tubrukan komet dan asteroid, yang telah mengakibatkan kepunahan masal, atau perpisahan dan pergerakan benua lewat hanyutan tektonik.

Kuliah BBC

Hoyle tak pernah menghindari pertarungan bagus. Pada 1949 Hoyle dan Gamow diundang oleh British Broadcasting Corporation untuk berdebat soal awal-mula alam semesta. Selama siaran Hoyle membuat sejarah ketika dia memukul teori pesaing. Dia berkata menentukan, "Teori-teori ini didasarkan pada hipotesis bahwa semua materi di

alam semesta tercipta dalam sebuah dentuman besar (*big bang*) pada waktu tertentu di masa yang sangat silam." Nama tersebut melekat. Teori pesaing kini resmi diberi nama "*big bang*" oleh musuh terbesarnya. (Dia kemudian mengklaim tidak bermaksud menghina. Dia mengakui, "Mana mungkin saya buat frase itu sebagai hinaan. Saya membuatnya sebagai serangan.")

(Selama bertahun-tahun para pendukung *big bang* berjuang secara heroik untuk mengubah nama itu. Mereka tidak puas dengan konotasi umum dan hampir kasar dari nama tersebut serta fakta bahwa itu dibuat oleh musuh terbesarnya. Para pemegang teguh kemurnian bahasa terutama merasa jengkel karena ini juga tidak tepat secara faktual. Pertama, *big bang* tidak besar (karena ia bermula dari singularitas kecil sesuatu yang jauh lebih kecil dari atom); kedua, tidak ada *bang* (karena tak ada udara di angkasa luar). Pada Agustus 1993, majalah *Sky and Telescope* mensponsori sebuah kontes untuk menamai ulang teori *big bang*. Kontes itu mengumpulkan 13.000 masukan, tapi juri tidak menemukan yang lebih baik dari nama orisinilnya.)

Yang memperkuat kemasyhuran Hoyle pada seluruh generasi adalah serial sains terkenalnya di radio BBC. Pada 1950-an, BBC berencana mengudarakan kuliah-kuliah sains setiap Sabtu malam. Namun, ketika tamu asli membatalkan, para produser terdesak untuk mencari pengganti. Mereka mengontak Hoyle, yang setuju tampil. Kemudian mereka mengecek arsipnya, di mana terdapat catatan berbunyi, "JANGAN PAKAI ORANG INI."

Kebetulan mereka mengabaikan peringatan seram dari produser terdahulu, maka dia pun memberikan lima kuliah memikat kepada dunia. Siaran klasik BBC ini menghipnotis negeri dan menginspirasi sebagian generasi astronom berikutnya. Astronom Wallace Sargent mengenang dampak siaran ini terhadap dirinya: "Saat berusia 15 tahun saya mendengar Fred Hoyle memberi kuliah di BBC berjudul *The Nature of the Universe*. Pemikiran bahwa kita tahu berapa suhu dan densitas di pusat Matahari, itu jadi semacam guncangan. Di usia 15, hal demikian di luar pengetahuan. Bukan sekadar angka mengagumkan, tapi fakta bahwa Anda dapat mengetahuinya sama sekali."

Nukleosintesis Pada Bintang

Hoyle, yang meremehkan spekulasi teoritis belaka, bermaksud menguji teori *steady state*-nya. Dia menyukai ide bahwa unsur-unsur alam semesta dimasak bukan dalam *big bang*, sebagaimana diyakini Gamow, melainkan di pusat bintang. Jika ratusan atau lebih unsur kimiawi semuanya terbentuk oleh panas hebat bintang-bintang, maka tidak ada kebutuhan akan *big bang* sama sekali.

Dalam serangkaian makalah rintisan yang dipublikasikan pada 1940-an dan 1950-an, Hoyle dan koleganya menyusun secara detil dan gamblang bagaimana reaksi-reaksi nuklir dalam inti bintang, bukan *big bang*, bisa menambah semakin banyak proton dan netron pada nukleus hidrogen dan helium, hingga membentuk semua unsur berat, sekurangnya sampai besi. (Mereka memecahkan misteri terbentuknya

unsur-unsur bernomor massa lebih dari 5, yang telah membuat Gamow tersandung. Dengan satu pukulan jenius, Hoyle sadar bahwa bila terdapat sebentuk karbon tak stabil yang sebelumnya tak teramati, yang terbentuk dari tiga nukleus helium, mungkin ia dapat bertahan cukup lama untuk bertindak sebagai "jembatan", memungkinkan terbentuknya unsur-unsur berat. Dalam inti bintang-bintang, bentuk karbon tak stabil dan baru ini dapat bertahan cukup lama sehingga, dengan berturut-turut menambahkan neutron dan proton, kita dapat menciptakan unsur-unsur bernomor massa lebih dari 5 dan 8. Ketika bentuk karbon tak stabil ini betul-betul ditemukan, itu membuktikan dengan hebatnya bahwa nukleosintesis bisa terjadi pada bintang-bintang, ketimbang *big bang*. Hoyle bahkan menciptakan program komputer besar yang dapat menetapkan, hampir dari prinsip pertama, keberlimpahan relatif unsur-unsur yang kita jumpai di alam.)

Tapi panas hebat bintang-bintang pun tidak cukup untuk "memasak" unsur-unsur selain besi, seperti tembaga, nikel, seng, dan uranium. (Sulit sekali menyuling energi dengan memfusikan unsur-unsur selain besi, karena berbagai alasan, termasuk tolakan proton-proton dalam nukleus dan ketiadaan energi pengikat.) Untuk unsur-unsur berat itu, kita butuh oven lebih besar lagi—ledakan bintang-bintang masif, atau supernova. Karena triliunan derajat dapat dicapai dalam sakaratul maut bintang super-raksasa yang kolaps dengan keras, terdapat cukup energi di sana untuk "memasak" unsur-unsur selain besi. Ini berarti, sebagian besar unsur-unsur selain besi,

ternyata, terhembus dari atmosfer bintang-bintang yang meledak, atau supernova.

Pada 1957, Hoyle, serta Margaret dan Geoffrey Burbidge dan William Fowler, mempublikasikan karya, barangkali paling definitif, yang menguraikan langkah-langkah akurat untuk menambah unsur-unsur alam semesta dan memprediksi keberlimpahannya. Argumen mereka begitu akurat, kuat, dan persuasif sampai Gamow pun harus mengakui Hoyle telah memberikan gambaran nukleosintesis paling memaksa. Gamow, dengan gaya khas, bahkan membuat paragraf berikut, ditulis dalam gaya alkitab. Pada permulaan, ketika Tuhan sedang menciptakan unsur-unsur,

> Dalam keasyikan menghitung, Dia lupa menagih massa 5 dan selebihnya, maka wajar tak ada unsur-unsur berat yang bisa terbentuk. Tuhan kecewa sekali, dan pertama-tama ingin menyusutkan Alam Semesta kembali, lalu memulai lagi semuanya dari awal. Tapi itu akan terlalu sederhana. Maka, sebagai Yang Maha Kuasa, Tuhan memutuskan meralat kekeliruan-Nya dengan cara yang paling mustahil. Dan Tuhan berfirman, "Jadilah Hoyle." Maka ada-lah Hoyle. Dan Tuhan memandang Hoyle... Dan menyuruhnya membuat unsur-unsur berat dengan cara apapun yang dia sukai. Dan Hoyle putuskan membuat unsur-unsur berat di bintang-bintang, dan menyebarkannya lewat ledakan supernova.

Bukti Menentang Steady State

Namun, setelah berdekade-dekade, bukti-bukti di sejumlah bidang perlahan mulai menggunung menentang alam semesta *steady state*. Hoyle sendiri mendapati dirinya bertarung dalam pertempuran yang akan menemui kegagalan. Menurut teorinya, karena alam semesta tidak berevolusi melainkan terus-menerus menghasilkan materi baru, alam semesta awal semestinya sangat mirip dengan alam semesta hari ini. Galaksi-galaksi yang terlihat hari ini semestinya sangat mirip dengan galaksi-galaksi miliaran tahun lalu. Dengan demikian, teori *steady state* bisa terbantahkan jika terdapat tanda-tanda perubahan evolusi dramatis selama perjalanan miliaran tahun.

Pada 1960-an, sumber-sumber misterius tenaga dahsyat ditemukan di luar angkasa, dijuluki "quasar", atau objek *quasi-stellar*. (Saking mudah diingat, nama ini kemudian dipakai untuk sebuah perangkat TV.) Quasar menghasilkan tenaga sangat besar dan memiliki ingsutan merah yang besar, berarti mereka berjarak miliaran tahun-cahaya, dan mereka juga menerangi angkasa ketika alam semesta masih sangat muda. (Hari ini astronom yakin mereka adalah galaksi-galaksi muda raksasa, yang didorong oleh tenaga *black hole-black hole* besar.) Kita tidak melihat bukti quasar hari ini, meski menurut teori *steady state* semestinya mereka eksis. Setelah miliaran tahun, mereka lenyap.

Ada masalah lain dengan teori Hoyle. Ilmuwan menyadari ada terlalu banyak helium di alam semesta untuk cocok dengan prediksi alam semesta *steady state*. Helium, yang familiar sebagai gas pada balon atau zeppelin anak-anak, sebetulnya cukup langka di Bumi, tapi

merupakan unsur paling melimpah kedua di alam semesta setelah hidrogen. Ia begitu langka, karenanya pertama kali ditemukan di Matahari, bukan di Bumi. (Pada 1868, ilmuwan menganalisa cahaya dari Matahari yang diteruskan lewat prisma. Cahaya matahari yang terbelokkan bercerai-berai menjadi warna-warna pelangi biasa dan garis-garis spektrum, tapi ilmuwan juga mendeteksi garis-garis spektrum sayup yang disebabkan oleh unsur misterius yang belum pernah terlihat. Mereka keliru menganggapnya sebagai logam, yang namanya biasa berakhiran "ium", seperti litium dan uranium. Mereka menamai logam misterius ini dengan kata Yunani untuk matahari, "helios". Akhirnya pada 1895, helium ditemukan di Bumi dalam endapan uranium, dan, yang memalukan, ilmuwan mendapatinya sebagai gas, bukan logam. Alhasil, helium yang pertama kali ditemukan di Matahari terlahir dengan nama keliru.)

Jika helium purba sebagian besar terbentuk di bintang-bintang, sebagaimana diyakini Hoyle, maka semestinya cukup langka dan ditemukan dekat inti bintang. Tapi semua data astronomi menunjukkan helium sebetulnya berlimpah, menyusun sekitar 25% massa atom di alam semesta. Mereka ditemukan terdistribusi secara seragam di alam semesta (sebagaimana diyakini Gamow).

Hari ini kita tahu bahwa Gamow maupun Hoyle mempunyai potongan kebenaran menyangkut nukleosintesis. Gamow semula berpikir semua unsur kimiawi merupakan jatuhan atau abu *big bang*. Tapi teorinya menjadi korban celah 5-partikel dan 8-partikel. Hoyle mengira dapat menyapu bersih teori *big bang* sekaligus dengan

menunjukkan bahwa bintang-bintang "memasak" semua unsur, tanpa perlu *big bang* sama sekali. Tapi teorinya gagal menerangkan keberlimpahan helium yang kita tahu sekarang eksis di alam semesta.

Pada hakikatnya, Gamow dan Hoyle memberi kita gambaran nukleosinteesis yang saling melengkapi. Unsur-unsur paling ringan hingga massa 5 dan 8 memang terbentuk oleh *big bang*, sebagaimana diyakini Gamow. Hari ini, sebagai hasil temuan fisika, kita tahu *big bang* memang menghasilkan mayoritas deuterium, helium-3, helium-4, dan lithium-7 yang kita jumpai di alam. Tapi unsur-unsur berat sampai besi, sebagian besar dimasak di inti bintang-bintang, sebagaimana diyakini Hoyle. Jika kita tambahkan unsur selain besi (seperti tembaga, seng, dan emas) yang dihembuskan oleh panas supernova melepuhkan, maka kita punya gambaran lengkap yang menjelaskan keberlimpahan relatif semua unsur di alam semesta. (Setiap teori saingan kosmologi modern menghadapi tugas berat: menjelaskan keberlimpahan relatif ratusan unsur langka di alam semesta dan isotop mereka yang banyak.)

Bagaimana Bintang Terlahir

Satu produk sampingan dari debat sengit nukleosintesis ini adalah ia memberi kita deskripsi lumayan lengkap tentang siklus hidup bintang. Bintang khas seperti Matahari kita, memulai kehidupannya sebagai bola gas hidrogen baur berukuran besar yang disebut protobintang dan menyusut secara bertahap akibat gaya gravitasi. Begitu kolaps ia mulai berputar cepat (yang seringkali mengakibatkan pembentukan

sistem bintang ganda, di mana dua bintang saling mengejar dalam orbit elips, atau pembentukan planet-planet di bidang rotasi bintang). Inti bintang juga memanas luar biasa hingga menyentuh angka kira-kira 10 juta derajat atau lebih, ketika fusi hidrogen menjadi helium berlangsung.

Setelah bintang menjadi panas dan menyala, ia disebut bintang sekuens utama dan dapat membara selama sekitar 10 miliar tahun, lambat-laun mengubah intinya dari hidrogen menjadi ampas helium. Matahari kita saat ini sedang dalam pertengahan jalan melewati proses ini. Setelah era pembakaran hidrogen berakhir, bintang mulai membakar helium, dan segera sesudahnya mengembang hebat jadi seukuran orbit Mars dan menjadi "raksasa merah". Setelah bahan bakar helium di inti habis, lapisan luar bintang menghilang, menyisakan intinya saja, bintang "kerdil putih" hampir seukuran Bumi. Bintang-bintang kecil, seperti Matahari kita, akan mati di angkasa sebagai bongkahan material nuklir padam pada bintang kerdil putih.

Tapi pada bintang, barangkali 10 sampai 40 kali lipat massa Matahari kita, proses fusi berlangsung jauh lebih pesat. Ketika bintang menjadi super-raksasa merah, intinya dengan cepat memfusikan unsur-unsur ringan, sehingga menyerupai bintang hibrid, bintang kerdil putih di dalam raksasa merah. Pada bintang kerdil putih ini, unsur-unsur ringan sampai besi dalam tabel periodik unsur dapat terbentuk. Tatkala proses fusi mencapai tahap di mana unsur besi terbentuk, tak ada lagi energi yang dapat diekstrak dari proses fusi,

sehingga tungku nuklir tersebut, setelah miliaran tahun, akhirnya mati. Pada titik ini, bintang mendadak kolaps, menciptakan tekanan besar yang betul-betul mendorong elektron memasuki nukleus. (Densitasnya dapat melebihi 400 miliar kali densitas air.) Ini membuat suhu melonjak naik ke triliunan derajat. Energi gravitasi yang termampatkan ke dalam objek kecil ini meledak keluar menjadi supernova. Panas hebat dari proses ini menyebabkan fusi dimulai sekali lagi, dan unsur-unsur selain besi dalam tabel periodik tersintesiskan.

Super-raksasa merah Betelgeuse, contohnya, yang dapat dengan mudah dilihat di rasi Orion, bersifat tidak stabil; ia dapat meledak kapan pun sebagai supernova, memuntahkan sinar gamma dan sinar X dalam jumlah besar ke lingkungan sekitar. Manakala itu terjadi, supernova ini akan bisa dilihat di siang hari dan dapat melebihi cahaya Matahari di malam hari. (Pernah ada anggapan bahwa energi raksasa yang dilepaskan oleh supernova memusnahkan dinosaurus 65 juta tahun lampau. Sebuah supernova yang jauhnya sekitar 10 tahun-cahaya bahkan dapat mengakhiri semua kehidupan di Bumi. Untungnya, bintang-bintang raksasa seperti Spica dan Betelgeuse berjarak 260 dan 430 tahun-cahaya, terlalu jauh untuk menimbulkan kerusakan serius pada Bumi jika akhirnya mereka meledak. Tapi sebagian ilmuwan percaya bahwa kepunahan kecil makhluk-makhluk laut 2 juta tahun silam disebabkan oleh ledakan supernova sebuah bintang yang jauhnya 120 tahun-cahaya.)

Ini juga mengandung arti bahwa Matahari kita bukan “ibu” sejati

Bumi. Walau banyak orang Bumi menyembah Matahari sebagai dewa yang melahirkan Bumi, ini hanya benar secara parsial. Meski Bumi mulanya terbentuk dari Matahari (sebagai bagian dari bidang elips puing dan debu yang mengedari Matahari 4-5 miliar tahun lalu), Matahari kita hampir tidak cukup panas untuk memfusikan hidrogen menjadi helium. Berarti "ibu" sejati kita sebenarnya adalah bintang atau kumpulan bintang tak bernama yang mati miliaran tahun lalu dalam sebuah supernova, yang kemudian menyemai nebula-nebula sekitar dengan unsur-unsur tinggi (selain besi) yang menyusun tubuh kita. Sesungguhnya, tubuh kita terbuat dari debu bintang, dari bintang-bintang yang mati miliaran tahun lalu.

Buntut dari ledakan supernova, terdapat ampas kecil yang disebut bintang neutron, terbuat dari materi nuklir padat yang termampatkan jadi seukuran Manhattan, hampir berukuran 20 mil. (Bintang-bintang neutron pertama kali diprediksikan oleh astronom Swiss, Fritz Zwicky, pada 1933, tapi mereka begitu fantastik sehingga diabaikan oleh ilmuwan selama berdekade-dekade.) Karena bintang neutron memancarkan radiasi secara tak teratur dan juga berputar pesat, ia menyerupai mercusuar yang berputar, memuntahkan radiasi selagi berotasi. Sebagaimana terlihat dari Bumi, bintang neutron tampak berdenyut (*pulsate*) dan oleh karenanya disebut pulsar.

Bintang-bintang yang amat besar, barangkali lebih dari 40 massa surya, ketika akhirnya mengalami ledakan supernova, dapat menyisakan bintang neutron berukuran lebih dari 3 massa surya. Gravitasi bintang neutron ini begitu besar sehingga dapat menetralkan gaya

tolak di antara neutron-neutron, dan bintang ini akan mengalami kolaps terakhirnya menjadi objek barangkali paling eksotis di alam semesta, *black hole*, yang saya bahas di bab 5.

Tahi Burung dan Big Bang

Pancang terakhir dalam jantung teori *steady state* adalah temuan Arno Penzias dan Robert Wilson pada 1965. Bekerja di Bell Laboratory Holmdell Horn Radio Telescope 20 kaki di New Jersey, mereka sedang mencari sinyal radio dari angkasa ketika menangkap gangguan tak diinginkan. Mereka pikir itu adalah aberasi, karena datang secara seragam dari semua arah, ketimbang dari satu bintang atau galaksi. Setelah beranggapan gangguan tersebut berasal dari kotoran dan puing, dengan hati-hati mereka membersihkan apa yang Penzias lukiskan sebagai "lapisan putih material dielektris" (secara umum dikenal sebagai tahi burung) yang telah menutupi bagian depan (*opening*) teleskop radio. Gangguan tersebut terlihat lebih besar. Tanpa disadari, mereka telah menemukan gelombang mikro latar yang diprediksikan oleh kelompok Gamow pada tahun 1948 dahulu.

Nah sejarah kosmologi sedikit mirip polisi Keystone, di mana tiga kelompok mencari-cari jawaban tanpa tahu satu sama lain. Di satu sisi, Gamow, Alpher, dan Hermann meletakkan teori di balik gelombang mikro latar pada tahun 1948 silam; mereka memprediksikan suhu radiasi gelombang mikro sebesar 5 derajat di atas nol absolut. Namun, mereka menyerah dalam usaha mengukur radiasi latar angkasa karena instrumen kala itu tidak cukup sensitif untuk mendeteksinya.

Pada 1965, Penzias dan Wilson menemukan radiasi benda hitam ini tapi tidak menyadarinya. Sementara itu, kelompok ketiga, dipimpin oleh Robert Dicke dari Universitas Princeton, secara terpisah menemukan ulang teori Gamow dan koleganya dan secara aktif mencari radiasi latar, tapi peralatan mereka sedihnya terlalu primitif untuk menemukannya.

Situasi menggelikan ini berakhir ketika seorang teman bersama, astronom Bernard Burke, memberitahu Penzias tentang penelitian Robert Dicke. Saat kedua kelompok itu akhirnya terhubung, menjadi jelaslah bahwa Penzias dan Wilson telah mendeteksi sinyal-sinyal dari *big bang* itu sendiri. Atas penemuan amat penting ini, Penzias dan Wilson memenangkan Hadiah Nobel pada 1978.

Jika ditilik ke belakang, Hoyle dan Gamow, dua pendukung paling nyata atas teori-teori berseberangan, mengalami perjumpaan menentukan dalam sebuah Cadillac pada 1956 yang bisa saja mengubah arah kosmologi. "Saya ingat George membawa saya berkeliling dengan Cadillac putih," kenang Hoyle. Gamow mengulangi keyakinannya kepada Hoyle bahwa *big bang* menyisakan pijaran susulan yang semestinya terlihat hingga hari ini. Bagaimanapun, angka-angka terakhir Gamow menempatkan suhu pijaran tersebut pada 50 derajat. Waktu itu Hoyle membuat pengungkapan mengejutkan kepada Gamow. Hoyle mengetahui sebuah makalah samar, ditulis pada 1941 oleh Andrew McKellar, yang menunjukkan bahwa suhu angkasa luar tidak boleh melebihi 3 derajat. Pada suhu tinggi dapat terjadi reaksi-reaksi baru yang akan menghasilkan radikal karbon-

hidrogen (CH) dan karbon-nitrogen (CN) terstimulasi di angkasa luar. Dengan mengukur spektrum bahan-bahan kimiawi ini kita dapat menetapkan suhu angkasa luar. Bahkan, dia mendapati densitas molekul CN yang terdeteksi di angkasa mengindikasikan suhu sekitar 2,3 derajat K. Dengan kata lain, tanpa diketahui Gamow, radiasi latar 2,7 K telah terdeteksi secara tak langsung pada 1941.

Hoyle mengenang, "Entah karena terlalu nyaman dalam Cadillac, atau karena George menginginkan suhu lebih tinggi dari 3 K, sedangkan saya menginginkan suhu nol derajat, kami melewatkan kesempatan menyoroti penemuan yang dibuat 9 tahun kemudian oleh Arno Penzias dan Bob Wilson." Andai kelompok Gamow tidak membuat galat angka dan menghasilkan suhu lebih rendah, atau andai Hoyle tidak begitu memusuhi teori *big bang*, mungkin sejarah akan tertulis lain.

Goncangan Personal Dari Big Bang

Penemuan gelombang mikro latar oleh Penzias dan Wilson menimbulkan pengaruh terhadap karir Gamow dan Hoyle. Bagi Hoyle, penelitian Penzias dan Wilson merupakan *near-death experience*. Akhirnya, dalam majalah *Nature* tahun 1965, Hoyle resmi mengaku kalah, menyebut gelombang mikro latar dan keberlimpahan helium sebagai alasan meninggalkan teori *steady state* miliknya. Tapi yang sebetulnya menggelisahkan dirinya adalah bahwa teori *steady state* telah kehilangan daya prediksi: "Diyakini luas bahwa eksistensi gelombang mikro latar menghabisi kosmologi '*steady state*', tapi yang

sebetulnya menghabisi teori *steady state* adalah psikologi... Di sini, dalam gelombang mikro latar, terdapat fenomena penting yang belum ia prediksikan... Selama bertahun-tahun, ini memukul diri saya setengah mati." (Hoyle kemudian berputar balik, mencoba mengerjakan variasi-variasi baru teori *steady state* alam semesta secara asal-asalan, tapi tiap variasi jadi semakin kurang masuk akal.)

Sayangnya, persoalan prioritas menyisakan rasa pahit di mulut Gamow. Gamow, bila kita baca secara teliti, tidak senang penelitian miliknya dan Alpher dan Hermann jarang disebut-sebut, jika ada. Santun seperti biasa, dia tetap bungkam tentang perasaannya. Tapi dalam surat-surat pribadi dia menulis, adalah tidak adil jika fisikawan dan sejarawan mengabaikan penelitian mereka sepenuhnya.

Walaupun karya Penzias dan Wilson menjadi tamparan keras bagi teori *steady state* dan membantu meletakkan *big bang* di atas pijakan eksperimen yang kokoh, terdapat gap besar dalam pemahaman kita akan struktur alam semesta mengembang. Dalam alam semesta Friedmann, contohnya, kita harus tahu harga Omega, rerata distribusi materi di alam semesta, untuk memahami evolusinya. Namun, penetapan Omega jadi cukup problematis manakala disadari bahwa sebagian besar alam semesta bukan tersusun dari atom dan molekul familiar melainkan zat baru yang disebut "*dark matter*", yang beratnya melebihi berat materi biasa dengan selisih sebesar faktor 10. Sekali lagi, para pemimpin di bidang ini tidak diperhatikan secara serius oleh komunitas astronomi.

Omega dan Dark Matter

Kisah *dark matter* barangkali merupakan salah satu bab teraneh dalam kosmologi. Pada 1930-an silam, astronom non-konvensional Swiss, Fritz Zwicky dari Cal Tech, memperhatikan bahwa galaksi-galaksi di Gugus Coma tidak bergerak secara benar di bawah gravitasi Newtonian. Dia mendapati galaksi-galaksi ini bergerak begitu cepat sehingga seharusnya mereka terbang memisah dan gugus itu semestinya bubar, menurut hukum gerak Newton. Satu-satunya cara, pikirnya, agar gugus Coma dapat terus bersatu, tidak terbang memisah, adalah bila gugus tersebut mempunyai materi ratusan kali lebih banyak daripada yang terlihat oleh teleskop. Entah karena hukum Newton tidak benar pada jarak galaktik atau sebab lainnya, terdapat sejumlah besar materi tak tampak yang terluputkan di gugus Coma yang menjaga kesatuannya.

Ini menjadi indikasi pertama dalam sejarah bahwa ada yang sangat keliru berkenaan dengan distribusi materi di alam semesta. Sayangnya, astronom di seluruh dunia menolak atau mengabaikan penelitian rintisan Zwicky untuk beberapa alasan.

Pertama, astronom enggan percaya bahwa gravitasi Newtonian, yang telah mendominasi fisika selama beberapa abad, boleh jadi salah. Terdapat preseden untuk penanganan krisis seperti ini dalam astronomi. Ketika orbit Uranus dianalisa di abad 19, ia didapati terhuyung—menyimpang sedikit dari persamaan Isaac Newton. Jadi Newton keliru, atau kalau tidak, harus ada satu planet baru yang gravitasinya menarik Uranus. Pilihan terakhir yang benar, dan

Neptunus ditemukan dalam usaha pertama pada tahun 1846 dengan menganalisa lokasi yang diprediksi oleh hukum Newton.

Kedua, ada persoalan ketokohan Zwicky dan cara astronom memperlakukan "orang luar". Zwicky adalah seorang visioner yang sering dicemooh atau diabaikan seumur hidupnya. Pada 1933, bersama Walter Baade, dia membuat istilah "supernova" dan memprediksikan secara tepat bahwa sebuah bintang neutron kecil, berdiameter sekitar 14 mil, akan menjadi ampas terakhir bintang meledak. Saking asingnya, ide tersebut disindir dalam kartun *Los Angeles Times* pada 19 Januari 1934. Zwicky geram terhadap sekelompok kecil astronom elit yang, dia pikir, mencoba membuatnya tidak diakui, mencuri ide-idenya, dan tidak memberinya waktu dengan teleskop 100 inchi dan 200 inchi. (Sesaat sebelum meninggal pada 1974, Zwicky menerbitkan sendiri sebuah katalog galaksi. Katalog tersebut dibuka dengan judul kepala, "*Sebuah Tandamata Untuk Para Pendeta Tinggi Astronomi Amerika dan Penjilat Mereka*". Esai ini memberikan kritik panas terhadap sifat eksklusif alamiah para elit astronomi, yang cenderung menghalang-halangi pemberontak seperti dirinya. "Penjilat dan pencuri masa kini rupanya bebas, khususnya dalam Astronomi Amerika, untuk menyita temuan dan ciptaan yang dibuat oleh serigala dan non-konformis yang sendirian," tulisnya. Dia menyebut individu-individu ini "bajingan bulat", karena "mereka adalah bajingan dari arah mana pun Anda memandang". Dia marah karena merasa diabaikan ketika Hadiah Nobel dianugerahkan kepada orang lain atas penemuan bintang neutron.)

Pada 1962, persoalan aneh terkait gerak galaktik ditemukan ulang oleh astronom Vera Rubin. Dia mempelajari rotasi galaksi Bima Sakti dan menemukan masalah yang sama; dia juga mendapat sambutan dingin dari komunitas astronomi. Normalnya, semakin jauh sebuah planet dari Matahari, semakin lambat ia bergerak. Semakin dekat ia, semakin cepat ia bergerak. Itulah mengapa Merkurius dinamai dengan nama dewa kecepatan, sebab ia begitu dekat dengan Matahari, dan itulah mengapa kecepatan Pluto 10 kali lebih lambat daripada Merkuri, sebab ia paling jauh dari Matahari. Namun, ketika Vera Rubin menganalisa bintang-bintang biru di galaksi kita, ternyata bintang-bintang tersebut mengitari galaksi dengan laju yang sama, terlepas dari jarak mereka ke pusat galaksi (yang disebut kurva rotasi flat), dengan demikian melanggar ajaran mekanika Newtonian. Bahkan, dia mendapati galaksi Bima Sakti berotasi begitu cepat sehingga, menurut aturan, semestinya terbang berpisahan. Tapi galaksi tersebut telah cukup stabil selama sekitar 10 miliar tahun; yang jadi misteri mengapa kurva rotasi berbentuk flat. Untuk menjaga galaksi ini dari disintegrasi, ia harus 10 kali lebih berat daripada yang dibayangkan ilmuwan saat ini. Rupanya, 90% massa galaksi Bima Sakti terluputkan!

Vera Rubin diabaikan, sebagian karena dia wanita. Dengan pedih dia mengenang, saat mendaftar di jurusan sains Swarthmore College dan bercerita iseng kepada petugas penerimaan bahwa dirinya senang melukis, si pewawancara berkata, “Sudahkah kau mempertimbangkan karir di mana kau dapat melukis objek-objek astronomi?” Dia

mengenang, "Itu menjadi slogan dalam keluarga saya: selama bertahun-tahun, bila ada sesuatu yang berjalan keliru pada seseorang, kami berkata, 'Sudahkah kau mempertimbangkan karir di mana kau dapat melukis objek-objek astronomi?'" Saat dia beritahu guru fisika SMA-nya bahwa dirinya diterima di Vassar, sang guru menjawab, "Kau pasti baik-baik saja asalkan menjauh dari sains." Dia kemudian mengenang, "Butuh harga diri amat besar untuk mendengarkan hal-hal seperti itu dan tidak runtuh."

Setelah lulus, dia melamar dan diterima di Harvard, tapi mundur lantaran menikah dan ikut suaminya, seorang kimiawan, ke Cornell. (Dia mendapat surat dari Harvard, dengan tulisan tangan di bagian bawahnya, "Celaka kalian wanita. Setiap kali saya menyiapkan seorang yang bagus, dia pergi menikah.") Baru-baru ini dia menghadiri konferensi astronomi di Jepang, dan dia satu-satunya wanita di situ. "Untuk waktu lama saya betul-betul tak mampu menceritakannya tanpa berderai air mata, sebab tak diragukan lagi dalam satu generasi....belum banyak yang berubah," dia mengaku.

Meski demikian, bobot penelitian cermatnya, dan penelitian orang lain, lambat-laun mulai meyakinkan komunitas astronomi tentang persoalan massa yang luput. Pada 1978, Rubin dan koleganya menyelidiki 11 galaksi spiral; semuanya berputar terlalu cepat untuk tetap bersatu, menurut hukum Newton. Pada tahun yang sama, astronom radio asal Belanda, Albert Bosma, mempublikasikan analisis paling lengkap atas lusinan galaksi spiral; hampir semuanya menampilkan perilaku anomali yang sama. Akhirnya ini meyakinkan

komunitas astronomi bahwa *dark matter* memang eksis.

Solusi paling sederhana untuk persoalan menyusahkan ini adalah mengasumsikan galaksi-galaksi dilingkungi oleh halo tak tampak yang mengandung materi 10 kali lebih banyak dibanding bintang-bintang itu sendiri. Sejak saat itu, telah dikembangkan cara lain yang lebih canggih untuk mengukur kehadiran materi tak tampak. Salah satu yang paling berkesan adalah dengan mengukur distorsi cahaya bintang yang menembus materi tak tampak. Seperti lensa kacamata, *dark matter* bisa menekuk cahaya (lantaran massa dan tarikan gravitasinya yang besar). Belakangan, dengan menganalisa foto-foto teleskop antariksa Hubble dengan komputer, ilmuwan mampu menyusun peta distribusi *dark matter* di seluruh alam semesta.

Pertarungan sengit terus berkecamuk untuk menemukan dari apa *dark matter* terbuat. Beberapa ilmuwan berpikir ia mungkin terbuat dari materi biasa, hanya saja sangat redup (yakni, terbuat dari bintang kerdil cokelat, bintang neutron, *black hole*, dan seterusnya, yang hampir tak terlihat). Objek-objek semacam itu menyatu sebagai "materi barionik", yaitu materi yang terbuat dari barion familiar (seperti neutron dan proton). Secara kolektif, mereka disebut MACHO (singkatan untuk Massive Compact Halo Objects).

Yang lain menduga *dark matter* tersusun dari materi non-barionik amat panas, seperti neutrino (disebut *dark matter* panas). Namun, neutrino bergerak cepat sekali sehingga tidak dapat menyumbang sebagian besar penggumpalan *dark matter* dan galaksi yang kita jumpai di alam. Yang lain lagi masih angkat tangan dan berpikir

bahwa *dark matter* terbuat dari tipe materi baru sama sekali, disebut "*dark matter* dingin", atau WIMP (*weakly interacting massive particles*), kandidat teratas untuk menjelaskan sebagian besar *dark matter*.

Satelit COBE

Dengan teleskop biasa, kuda penarik astronomi sejak zaman Galileo, kita tidak mungkin bisa memecahkan misteri *dark matter*. Astronomi telah berkembang luar biasa jauh dengan memakai optik Bumi standar. Namun, pada 1990-an, instrumen astronomi generasi baru sudah cukup dewasa, menggunakan teknologi satelit, laser, dan komputer teranyar dan mengubah wajah kosmologi sepenuhnya.

Salah satu buah pertama dari panen ini adalah satelit COBE (Cosmic Background Explorer), diluncurkan pada November 1989. Sementara penelitian asli Penzias dan Wilson mengkonfirmasi beberapa poin data saja dengan *big bang*, satelit COBE sanggup mengukur banyak poin data yang cocok persis dengan prediksi radiasi benda hitam yang dibuat oleh Gamow dan koleganya pada 1948.

Pada 1990, dalam sebuah pertemuan American Astronomical Society, 1.500 ilmuwan yang hadir mendadak berdiri bersorak-sorai begitu melihat hasil COBE di layar, memperlihatkan kecocokan nyaris sempurna dengan gelombang mikro latar bersuhu 2,728 K.

Astronom Princeton, Jeremiah P. Ostriker, berkata, "Ketika fosil-fosil ditemukan pada bebatuan, itu membuat asal-usul spesies menjadi jelas sama sekali. *Well*, COBE menemukan fosil-fosil [alam semesta]."

Namun, grafik dari COBE cukup kabur. Contohnya, ilmuwan ingin

menganalisa “titik panas” atau fluktuasi dalam radiasi kosmik latar, fluktuasi yang semestinya bersuhu sekitar satu derajat di angkasa. Tapi instrumen COBE hanya dapat mendeteksi fluktuasi yang bersuhu 7 derajat atau lebih; mereka tidak cukup sensitif untuk mendeteksi titik-titik panas kecil ini. Ilmuwan terpaksa menunggu hasil satelit WMAP, dijadwalkan meluncur pasca pergantian abad, yang mereka harap akan menjawab sekumpulan pertanyaan dan misteri.

Bab 4
Inflasi dan Alam Semesta Paralel

Nihil tidak bisa muncul dari nihil.

—Lucretius

Saya berasumsi Alam Semesta kita betul-betul muncul entah dari mana sekitar 10 pangkat 10 tahun lampau... Saya menawarkan proposal sederhana bahwa Alam Semesta kita hanya salah satu hal yang terjadi dari waktu ke waktu.

—Edward Tryon

Alam semesta adalah makan siang gratis termewah.

—Alan Guth

Dalam novel sains fiksi klasik, *Tau Zero*, yang ditulis oleh Poul Anderson, sebuah kapal bintang bernama Leonora Christine diluncurkan dalam misi menjangkau bintang-bintang dekat. Mengangkut 50 orang, kapal ini dapat mencapai hampir kecepatan cahaya sewaktu bepergian menuju sebuah sistem bintang baru. Yang lebih penting, kapal ini memakai prinsip relativitas khusus, yang menyatakan waktu melambat di dalam kapal seiring semakin cepat ia

bergerak. Karenanya, perjalanan ke bintang-bintang dekat yang memakan waktu berdekade-dekade bila dipandang dari Bumi, terasa berlangsung beberapa tahun saja bagi astronot. Bagi pengamat di Bumi yang memantau para astronot lewat teleskop, mereka seolah terbeku dalam waktu, berada dalam sejenis kematisurian. Tapi bagi astronot di kapal, waktu berjalan normal. Saat kapal bintang melambat dan para astronot mendarat di sebuah planet baru, mereka akan mendapati ternyata mereka sudah menempuh 30 tahun-cahaya dalam beberapa tahun saja.

Kapal tersebut merupakan keajaiban teknik; ia ditenagai oleh mesin fusi ramjet yang mengeduk hidrogen angkasa luar dan kemudian dibakar untuk memperoleh energi tak terbatas. Saking cepatnya ia melaju, sampai-sampai awak kapal dapat melihat ingsutan Doppler cahaya bintang; bintang-bintang di depan mereka tampak kebiruan, sementara bintang-bintang di belakang mereka tampak kemerahan.

Lalu malapetaka melanda. Sekitar 10 tahun-cahaya dari Bumi, kapal mengalami turbulensi sewaktu menerobos awan debu antar-bintang, dan mekanisme pelambatannya jadi lumpuh permanen. Awak kapal yang ketakutan mendapati diri mereka terjebak dalam kapal bintang pelarian, terus mencepat sambil mendekati kecepatan cahaya. Mereka tak berdaya menyaksikan kapal lepas kendali ini melintasi seluruh sistem bintang dalam hitungan menit. Dalam setahun, kapal bintang menempuh separuh galaksi Bima Sakti. Seraya berakselerasi di luar kendali, ia mencepat melewati galaksi-galaksi

dalam hitungan bulan, bahkan selagi jutaan tahun telah berlalu di Bumi. Segera, saking dekatnya dengan kecepatan cahaya, tau zero, mereka menyaksikan peristiwa-peristiwa kosmik, sementara alam semesta sendiri mulai menua di depan mata mereka.

Akhirnya, mereka paham perluasan orisinil alam semesta sedang berbalik, alam semesta menyusut. Suhu mulai naik dramatis, mereka sadar sedang menuju *big crunch*. Para awak kapal diam-diam berdoa, sementara suhu meroket, galaksi-galaksi mulai bergabung, dan atom kosmik purba terbentuk di depan mereka. Kematian melalui kremasi, kelihatannya, tak terelakkan lagi.

Harapan mereka satu-satunya adalah materi akan kolaps menjadi area terhingga berdensitas terhingga, dan bahwa, dengan melaju pada kecepatan tinggi, mereka dapat menyelinapinya cepat-cepat. Ajaibnya, perisai melindungi mereka sewaktu terbang menembus atom purba, dan mereka mendapati diri menyaksikan pembentukan alam semesta baru. Selagi alam semesta tersebut mengembang kembali, mereka kagum menyaksikan pembentukan bintang-bintang dan galaksi-galaksi baru di depan mata mereka. Mereka memperbaiki kapal antariksa dan dengan cermat merencanakan perjalanan guna mencari galaksi yang cukup tua untuk memiliki unsur-unsur berat yang akan memungkinkan kehidupan. Akhirnya, mereka menemukan sebuah planet yang dapat menaungi kehidupan lalu membangun koloni di situ untuk memulai ras manusia dari awal lagi.

Kisah ini ditulis pada 1967, saat berkecamuk perdebatan sengit di kalangan astronom mengenai nasib akhir alam semesta: apakah akan

mati dalam *big crunch* atau *big freeze*, akan terombang-ambing untuk jangka waktu tak terbatas, atau akan hidup selama-lamanya dalam *steady state*. Sejak saat itu, perdebatan ini sepertinya terjawab, dan telah muncul sebuah teori baru bernama inflasi.

Kelahiran Inflasi

"KESADARAN SPEKTAKULER," tulis Alan Guth dalam diarinya pada 1979. Dia merasa gembira, sadar bahwa dirinya mungkin telah menemukan salah satu ide kosmologi yang hebat. Guth membuat revisi penting pertama atas teori *big bang* dalam kurun 50 tahun dengan melakukan observasi rintisan: dia dapat memecahkan beberapa teka-teki terdalam kosmologi jika berasumsi alam semesta mengalami hiper-inflasi bertenaga turbin (*turbocharged hyper-inflation*) pada jenak kelahirannya, jauh lebih cepat daripada yang diyakini oleh kebanyakan ilmuwan. Dengan hiper-ekspansi ini, dia bisa dengan mudah memecahkan sekumpulan pertanyaan mendalam kosmologi yang sulit dijelaskan. Ide inilah yang akan muncul merevolusi kosmologi. (Data kosmologis mutakhir, termasuk hasil-hasil satelit WMAP, konsisten dengan prediksi ini.) Ini bukan satu-satunya teori kosmologi, tapi ini paling sederhana dan kredibel sampai sekarang.

Luar biasa, ide sesederhana itu mampu memecahkan begitu banyak pertanyaan kosmologis yang rumit. Salah satu persoalan yang dipecahkan secara elegan oleh teori inflasi adalah *flatness problem* (persoalan keflatan). Data astronomi menunjukkan, kelengkungan

alam semesta sangat mendekati nol, bahkan jauh lebih dekat dengan nol daripada yang sebelumnya diyakini mayoritas astronom. Ini dapat dijelaskan jika alam semesta, seperti balon yang sedang dipompa pesat, terflatkan selama periode inflasi. Kita seperti semut yang berjalan di permukaan balon, terlalu kecil untuk mengamati kelengkungan kecil pada balon. Inflasi telah sangat meregangkan ruang-waktu hingga ia tampak flat.

Yang juga bersejarah dari temuan Guth adalah itu melambangkan penerapan fisika partikel unsur, yang melibatkan analisa partikel-partikel terkecil di alam, pada kosmologi, studi alam semesta secara keseluruhan, termasuk awal-mulanya. Kini kita tahu bahwa misteri-misteri terdalam alam semesta tak bisa dipecahkan tanpa fisika [objek] amat kecil: dunia teori quantum dan fisika partikel unsur.

Mencari Unifikasi

Guth dilahirkan pada 1947 di New Brunswick, New Jersey. Tak seperti Einstein, Gamow, atau Hoyle, tidak ada instrumen atau momen rintisan yang mendorongnya ke dalam dunia fisika. Orangtuanya bukan lulusan universitas, pun tidak menampakkan minat besar terhadap sains. Tapi menurut pengakuannya sendiri, dia selalu terpesona oleh hubungan antara matematika dan hukum alam.

Di MIT pada 1960-an, dia serius mempertimbangkan karir dalam fisika partikel unsur. Terutama, dia terpesona oleh kegemparan yang ditimbulkan oleh revolusi baru yang menyapu fisika, pencarian unifikasi semua gaya fundamental. Selama berabad-abad, cawan suci

fisika adalah mencari tema penyatu yang mampu menjelaskan kompleksitas alam semesta dengan cara paling sederhana dan koheren. Sejak zaman Yunani para ilmuwan sudah menduga alam semesta yang kita lihat hari ini melambangkan serpihan ampas dari simplisitas lebih besar, dan sasaran kita adalah mengungkap unifikasi ini.

Setelah 2.000 tahun penyelidikan sifat materi dan energi, fisikawan menetapkan hanya 4 gaya fundamental yang menggerakkan alam semesta. (Ilmuwan sudah mencoba mencari gaya kelima, tapi sejauh ini semua hasilnya negatif atau tidak meyakinkan.)

Gaya pertama adalah gravitasi, yang menjaga kesatuan Matahari dan memandu planet-planet di orbit-orbit angkasa mereka di tata surya. Seandainya gravitasi mendadak "mati", bintang-bintang di angkasa akan meledak, Bumi akan bercerai-berai, dan kita semua akan terhempas ke angkasa luar dengan kecepatan sekitar seribu mil per jam.

Gaya besar kedua adalah elektromagnet, gaya yang menerangi kota-kota kita, mengisi dunia kita dengan TV, ponsel, radio, sinar laser, dan Internet. Seandainya gaya elektromagnetik mendadak mati, peradaban akan serta-merta terlempar satu atau dua abad ke masa lalu menuju kegelapan dan kesunyian. Ini tergambarkan secara nyata oleh pemadaman besar tahun 2003, yang melumpuhkan seluruh Timur Laut. Jika kita periksa gaya elektromagnet secara mikroskopis, kita lihat sebetulnya ia tersusun dari partikel-partikel kecil, atau quantum, yang disebut foton.

Gaya ketiga adalah gaya nuklir lemah, yang bertanggungjawab atas peluruhan radioaktif. Karena gaya nuklir lemah tidak cukup kuat untuk menjaga kesatuan nukleus atom, ini memungkinkan nukleus bubar atau meluruh. Pengobatan nuklir di rumah-rumah sakit sangat mengandalkan gaya nuklir ini. Gaya nuklir lemah juga membantu memanaskan pusat Bumi melalui material radioaktif, yang menggerakkan kekuatan dahsyat gunung-gunung berapi. Gaya nuklir lemah, pada gilirannya, didasarkan pada interaksi elektron dan neutrino (partikel mirip hantu yang hampir tak bermassa dan bisa menembus timah padat setebal triliunan mil tanpa berinteraksi dengan apapun). Elektron dan neutrino ini berinteraksi dengan bertukar partikel lain, yang disebut boson W dan boson Z.

Gaya nuklir kuat menjaga kesatuan nukleus atom. Tanpa gaya nuklir kuat, nukleus akan bercerai-berai, atom-atom akan pecah berantakan, dan realitas yang kita kenal akan lenyap. Gaya nuklir kuat bertanggungjawab atas kira-kira seratusan unsur yang memenuhi alam semesta. Bersama-sama, gaya nuklir lemah dan kuat bertanggungjawab atas cahaya yang keluar dari bintang-bintang melalui persamaan Einstein, $E = mc^2$. Tanpa gaya nuklir, seluruh alam semesta akan gelap, menjerumuskan suhu di Bumi dan membekukan lautan.

Fitur menakjubkan dari keempat gaya ini adalah bahwa mereka berbeda dari satu sama lain, dengan kekuatan dan atribut berbeda-beda. Contoh, gravitasi sejauh ini menjadi gaya terlemah di antara keempat gaya, 10^{36} kali lebih lemah daripada gaya elektromagnet.

Berat Bumi adalah 6 triliun triliun kilogram, tapi berat masif dan gravitasinya dapat dengan mudah dihapuskan oleh gaya elektromagnet. Sisir Anda, misalnya, dapat memungut remahan kertas melalui listrik statis, dengan demikian menghapus gravitasi seluruh bumi. Di samping itu, gravitasi sebatas menarik. Gaya elektromagnet bisa menarik ataupun menolak, tergantung muatan sebuah partikel.

Unifikasi Saat Big Bang

Salah satu pertanyaan fundamental yang dihadapi fisika adalah: mengapa alam semesta mesti diatur oleh 4 gaya terpisah? Dan mengapa keempat gaya ini mesti terasa begitu berbeda, dengan perbedaan kekuatan, perbedaan interaksi, dan perbedaan fisika?

Einstein adalah orang pertama yang memulai kampanye penyatuan gaya-gaya ini ke dalam satu teori komprehensif, diawali dengan menyatukan gaya gravitasi dengan gaya elektromagnet. Dia gagal karena terlalu jauh mendahului zamannya; terlalu sedikit yang diketahui tentang gaya kuat untuk membuat teori medan terpadu yang realistis. Tapi usaha rintisan Einstein membuka mata dunia fisika atas kemungkinan "*theory of everything*".

Cita-cita teori medan terpadu seakan tak ada harapan sama sekali pada 1950-an, khususnya ketika fisika partikel unsur berada dalam kekacauan total, di mana pemecah atom menghancurkan nukleus untuk menemukan "konstituen elementer" materi, hanya untuk mendapati ratusan partikel lain mengalir dari eksperimen-eksperimen. "Fisika partikel unsur" menjadi istilah yang kontradiktif,

sebuah lelucon kosmik. Bangsa Yunani berpikir, seiring kita memecah suatu zat menjadi blok-blok dasar penyusunnya, keadaan lebih sederhana. Yang terjadi justru sebaliknya: fisikawan berjuang menemukan cukup huruf dalam abjad Yunani untuk menamai partikel-partikel ini. J. Robert Oppenheimer bergurau, Hadiah Nobel fisika semestinya diberikan kepada fisikawan yang *tidak* menemukan partikel baru. Peraih Nobel Steven Weinberg mulai bertanya-tanya apakah pikiran manusia sanggup memecahkan rahasia gaya nuklir.

Namun, hiruk-pikuk kebingungan ini dijinakkan pada awal 1960-an saat Murray Gell-Mann dan George Zweig dari Cal Tech mengajukan ide quark, konstituen yang menyusun proton dan neutron. Menurut teori quark, 3 quark menyusun proton atau neutron, dan quark dan antiquark menyusun meson (partikel yang menjaga kesatuan nukleus). Solusi ini parsial (karena hari ini kita dibanjiri berbagai tipe quark), tapi memang menyuntikkan energi baru ke dalam bidang yang pernah terbengkalai.

Pada 1967, sebuah terobosan mencengangkan dibuat oleh Steven Weinberg dan Abdus Salam, yang menunjukkan bahwa penyatuan gaya nuklir lemah dan gaya elektromagnet adalah memungkinkan. Mereka menciptakan teori baru di mana elektron dan neutrino (yang disebut lepton) saling berinteraksi dengan bertukar partikel baru bernama boson W dan boson Z dan juga foton. Dengan memperlakukan boson W dan boson Z dan foton di atas pijakan yang sama, mereka menciptakan teori yang menyatukan kedua gaya. Pada 1979, Steven Weinberg, Sheldon Glashow, dan Abdus Salam dianugerahi

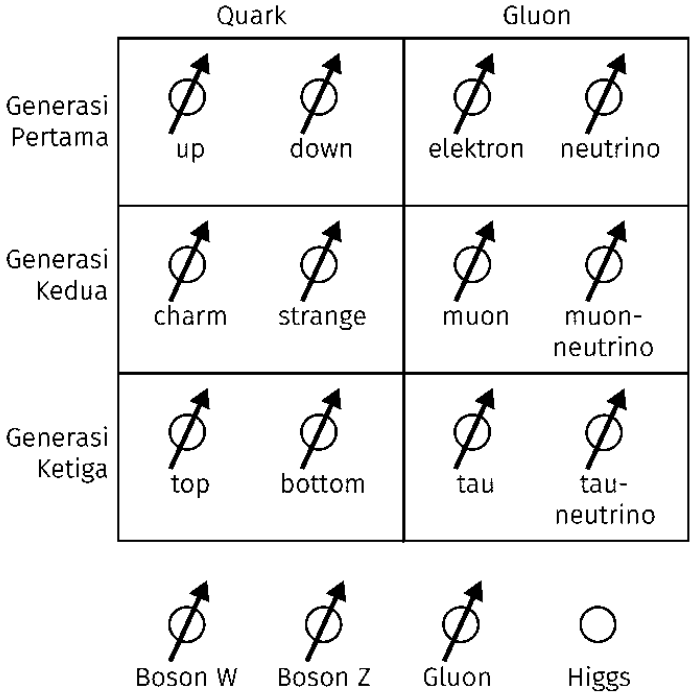
Hadiah Nobel atas penelitian kolektif mereka dalam penyatuan dua dari empat gaya yang ada, gaya elektromagnet dengan gaya nuklir lemah, dan menyediakan wawasan mengenai gaya nuklir kuat.

Pada 1970-an, fisikawan menganalisa data dari akselerator partikel di Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), yang menembakkan sorot intens elektron-elektron ke sebuah target dalam rangka menyelidiki interior proton. Mereka menemukan, ternyata gaya nuklir kuat yang menjaga kesatuan quark di dalam proton bisa dijelaskan dengan memperkenalkan partikel baru bernama gluon, yang merupakan quantum gaya nuklir kuat. Gaya pengikat yang menjaga kesatuan proton bisa dijelaskan oleh pertukaran gluon antara quark-quark konstituen. Ini membawa pada teori gaya nuklir kuat baru yang disebut Kromodinamika Quantum.

Jadi menjelang pertengahan 1970-an kita sudah dapat mengawinkan tiga dari empat gaya yang ada (selain gravitasi) dan memperoleh apa yang disebut Standard Model, sebuah teori quark, elektron, dan neutrino, yang berinteraksi dengan bertukar gluon, boson W dan boson Z, dan foton. Ini adalah puncak penelitian lambat dan lara selama berdekade-dekade dalam fisika partikel. Sekarang ini, Standard Model cocok dengan semua data eksperimen menyangkut fisika partikel, tanpa kecuali.

Walaupun Standard Model menjadi salah satu teori fisika tersukses sepanjang masa, jeleknya bukan main. Sulit dipercaya, alam pada level fundamental dapat beroperasi berdasarkan sebuah teori yang kelihatan dirangkai secara kasar. Contoh, terdapat 19 parameter

sembarang dalam teori yang disisipkan dengan tangan, tanpa sebab apapun (dengan kata lain, berbagai massa dan kekuatan interaksi bukan ditetapkan oleh teori, tapi harus ditetapkan oleh eksperimen; idealnya, dalam teori terpadu sejati, konstanta-konstanta ini ditetapkan oleh teori itu sendiri, tanpa mengandalkan eksperimen luar.)



Gambar 7: Ini adalah partikel-partikel subatom yang termuat dalam Standard Model, teori partikel unsur tersukses. Model ini tersusun dari quark, yang menyusun proton dan neutron, lepton mirip elektron dan lepton netral (neutrino), dan banyak partikel lain. Perhatikan, model ini menghasilkan tiga salinan identik partikel subatom. Karena Standard Model gagal menerangkan gravitasi (dan kelihatan begitu janggal), para fisikawan teoritis merasa ini tidak bisa menjadi teori final.

Lebih lanjut, ada tiga salinan persis partikel unsur, disebut generasi (*generation*). Sulit dipercaya bahwa alam, pada level paling fundamentalnya, memuat tiga salinan persis partikel subatom. Kecuali untuk massanya, generasi-generasi ini merupakan duplikat satu sama lain. (Contoh, salinan karbon elektron mencakup muon, yang 200 kali lebih berat daripada elektron, dan partikel tau, yang 3.500 kali lebih berat.) Dan terakhir, Standard Model tidak menyebutkan gravitasi, padahal gravitasi mungkin gaya paling menyebar di alam semesta.

Karena Standard Model, terlepas dari kesuksesan eksperimennya yang mengejutkan, kelihatan begitu dibuat-buat, fisikawan mencoba mengem-bangkan teori lain, atau teori terpadu akbar (GUT/*grand unified theory*), yang meletakkan quark dan lepton pada pijakan yang sama. Ia juga memperlakukan gluon, boson W dan boson Z, dan foton pada level yang sama. (Namun ia tidak bisa menjadi "teori final", sebab gravitasi jelas-jelas masih ditinggalkan, dianggap terlalu sulit untuk bergabung dengan gaya lain, sebagaimana akan kita simak nanti.)

Program unifikasi ini, pada gilirannya, memperkenalkan paradigma baru ke dalam kosmologi. Idenya sederhana dan elegan: pada jenak *big bang*, semua gaya fundamental bersatu dalam gaya koheren tunggal, sebuah "supergaya" misterius. Keempat gaya mempunyai kekuatan yang sama dan menjadi bagian dari kesatuan koheren besar. Alam semesta berawal dalam status kesempurnaan. Namun, seiring alam semesta mulai mengembang dan mendingin pesat, supergaya orisinil mulai "retak", di mana berbagai gaya terlepas

satu persatu.

Menurut teori ini, pendinginan alam semesta pasca *big bang* dapat dianalogikan dengan pembekuan air. Saat air berbentuk cairan, ia seragam dan mulus. Namun, ketika membeku, jutaan kristal es kecil terbentuk di dalam. Ketika air cair membeku total, keseragaman orisinilnya rusak sama sekali, es mengandung retak, gelembung, dan kristal.

Dengan kata lain, hari ini kita lihat alam semesta rusak parah. Ia tidak seragam atau simetris sama sekali, melainkan terdiri dari rangkaian pegunungan bergerigi, gunung berapi, badai, asteroid berbatu, dan bintang meledak, tanpa kesatuan koheren; lebih jauh, kita juga lihat empat gaya fundamental tidak punya hubungan dengan satu sama lain. Tapi alasan mengapa alam semesta begitu rusak adalah karena ia tua dan dingin.

Walaupun alam semesta berawal dalam status kesatuan sempurna, hari ini ia telah melewati banyak transisi fase, atau perubahan kondisi, di mana gaya-gaya alam semesta membebaskan diri dari yang lain satu persatu selagi ia mendingin. Tugas fisikawanlah untuk berjalan ke belakang, untuk merekonstruksi langkah-langkah yang mengawali alam semesta (dalam status kesempurnaan) dan yang menghasilkan alam semesta rusak di sekeliling kita.

Maka kuncinya adalah memahami secara akurat bagaimana transisi fase ini terjadi di permulaan alam semesta, yang fisikawan sebut "kerusakan spontan". Entah itu pelelehan es, pendidihan air, pembentukan awan hujan, atau pendinginan *big bang*, transisi-transisi

fase dapat menghubungkan dua fase materi yang sama sekali berbeda. (Untuk mengilustrasikan bisa seberapa hebat transisi fase ini, seniman Bob Miller berteka-teki: "Bagaimana Anda dapat menggantung 500.000 pon air di udara tanpa alat topang? Jawabannya: bangun sebuah awan.")

False Vacuum

Ketika sebuah gaya bercerai dari gaya-gaya lain, proses tersebut dapat disamakan dengan kerusakan bendungan. Sungai mengalir turun karena air mengalir ke arah energi terendah, yakni permukaan laut. Status energi terendah disebut *vacuum*. Namun, ada status tak biasa yang disebut *false vacuum*. Jika kita membendung sungai, contohnya, bendungan terlihat stabil, padahal sebetulnya ia berada di bawah tekanan amat besar. Jika terdapat retak kecil pada bendungan, tekanan itu dapat menjebol bendungan secara tiba-tiba dan melepaskan semburan energi dari *false vacuum* (sungai terbendung) dan menimbulkan bencana banjir ke arah *true vacuum* (permukaan laut). Seluruh desa terkena banjir jika bendungan mengalami kerusakan spontan dan terjadi transisi mendadak menuju *true vacuum*.

Demikian pula, menurut teori GUT, alam semesta berawal dengan status *false vacuum*, di mana tiga gaya bersatu dalam gaya tunggal. Namun teori ini tidak kokoh, dan teori ini rusak spontan dan membuat transisi dari *false vacuum*, di mana gaya-gaya bersatu, menuju *true vacuum*, di mana gaya-gaya bercerai.

Ini sudah diketahui sebelum Guth mulai menganalisa teori GUT.

Tapi Guth memperhatikan sesuatu yang terabaikan oleh orang lain. Dalam status *false vacuum*, alam semesta mengembang secara eksponensial, sebagaimana yang diprediksikan oleh de Sitter pada 1917 silam. Konstanta kosmologilah, energi *false vacuum*, yang mendorong alam semesta untuk mengembang pada laju sedemikian tinggi. Guth mengajukan pertanyaan menentukan kepada dirinya sendiri: bisakah perluasan eksponensial de Sitter ini memecahkan beberapa persoalan kosmologi?

Persoalan Monokutub

Salah satu dari banyak prediksi teori GUT adalah produksi jumlah monokutub yang berlebihan di permulaan masa. Monokutub adalah kutub magnet utara atau kutub magnet selatan. Secara alami, kutub-kutub ini selalu ditemukan berpasangan. Jika Anda memegang magnet, Anda selalu mendapati kutub utara maupun kutub selatan terikat bersama. Jika Anda mengambil palu dan membelah sebuah magnet, maka Anda tidak mendapatkan dua monokutub; justru, Anda memperoleh dua magnet kecil, dengan pasangan kutub utara dan kutub selatannya masing-masing.

Persoalannya, setelah berabad-abad eksperimen ilmuwan tidak mene-mukan bukti monokutub yang meyakinkan. Karena tak ada yang pernah melihat monokutub, Guth kebingungan mengapa teori GUT memprediksikan begitu banyak monokutub. "Seperti *unicorn*[3], monokutub masih terus mempesona pikiran manusia terlepas dari tak

[3] Kuda legenda dengan satu tanduk lurus—penj.

adanya konfirmasi observasi," ucap Guth.

Kemudian tiba-tiba dia mendapat gagasan. Dalam sekejap, semua kepingan saling cocok. Dia sadar, jika alam semesta berawal dalam status *false vacuum*, ia dapat mengembang secara eksponensial, sebagaimana de Sitter kemukakan berdekade-dekade sebelumnya. Dalam status *false vacuum* ini, alam semesta dapat mendadak berinflasi secara luar biasa, dengan begitu melemahkan densitas monokutub. Jika ilmuwan belum pernah melihat monokutub, itu karena monokutub tersebar di alam semesta yang jauh lebih besar daripada perkiraan sebelumnya.

Bagi Guth, pengungkapan ini menjadi sumber ketakjuban dan kesenangan. Observasi sedemikian sederhana dapat menjelaskan persoalan monokutub dalam satu pukulan. Tapi Guth sadar, prediksi ini akan mempunyai implikasi kosmologis jauh melebihi ide awalnya.

Persoalan Keflatan

Guth sadar teorinya memecahkan persoalan lain, persoalan keflatan, yang telah dibahas sebelumnya. Gambaran standar *big bang* tidak dapat menjelaskan mengapa alam semesta begitu flat. Pada 1970-an, diyakini bahwa densitas materi di alam semesta, disebut Omega, adalah sekitar 0,1. Fakta bahwa ini relatif dekat dengan densitas kritis 1,0 bermiliar-miliar tahun pasca *big bang* sungguh menggelisahkan. Karena alam semesta mengembang, semestinya Omega berubah seiring waktu. Tak enaknya, angka ini dekat dengan harga 1,0, yang menggambarkan ruang angkasa flat sempurna.

Berapapun harga logis Omega di permulaan masa, persamaan Einstein menunjukkan semestinya ia hampir nol hari ini. Agar harga Omega mendekati angka 1 bermiliar-miliar tahun pasca *big bang*, itu butuh keajaiban. Inilah yang dalam kosmologi disebut sebagai *finetuning problem* (persoalan penyetelan halus). Tuhan, atau pencipta, harus "memilih" harga Omega dalam marjin akurasi yang fantastik supaya Omega berharga sekitar 0,1 hari ini. Agar Omega berada antara 0,1 sampai 10 pada hari ini, Omega harus seharga 1,00000000000000 satu detik pasca *big bang*. Dengan kata lain, di permulaan masa, harga Omega harus "dipilih" setara dengan angka 1 hingga marjin 1 per 100 triliun, yang mana sulit dijangkau pikiran.

Bayangkan mencoba mengimbangkan sebatang pensil secara vertikal pada ujungnya. Tak peduli seberapa keras kita mencoba, lumrahnya ia jatuh. Kenyataannya, perlu penyetelan halus berpresisi tinggi untuk mengimbangkan pensil dengan tepat agar tidak jatuh. Nah, coba seimbangkan pensil pada ujungnya agar tetap vertikal bukan hanya selama satu detik, melainkan bertahun-tahun! Anda menyaksikan penyetelan hebat untuk memperoleh Omega seharga 0,1 hari ini. Keliru sedikit saja dalam penyetelan Omega akan menghasilkan Omega dengan harga jauh dari 1. Jadi mengapa Omega begitu dekat dengan 1 hari ini, padahal menurut aturan semestinya berselisih jauh?

Bagi Guth, jawabannya sangat jelas. Alam semesta berinflasi dengan derajat luar biasa hingga memflatkan alam semesta. Seperti seseorang yang menyimpulkan Bumi flat karena dia tidak mampu

melihat horison, astronom menyimpulkan harga Omega sekitar 1 karena inflasi memflatkan alam semesta.

Persoalan Horison

Inflasi bukan cuma menjelaskan data yang mendukung keflatan alam semesta, ia juga memecahkan persoalan horison. Persoalan ini didasarkan pada kesadaran sederhana bahwa langit malam terlihat relatif seragam, tak peduli ke manapun Anda memandang. Jika Anda memutar kepala 180 derajat, Anda amati alam semesta itu seragam, sekalipun Anda baru melihat bagian-bagian alam semesta yang terpisah puluhan miliar tahun-cahaya. Teleskop-teleskop canggih yang memindai angkasa juga tidak menemukan penyimpangan berarti dari keseragaman ini. Satelit antariksa kita telah menunjukkan bahwa radiasi gelombang mikro kosmik juga sangat seragam. Tak peduli ke manapun Anda memandang angkasa, suhu radiasi latar tidak menyimpang lebih dari seperseribu derajat.

Tapi ini jadi persoalan, karena kecepatan cahaya merupakan batas kecepatan tertinggi di alam semesta. Tak mungkin, dalam seumur hidup alam semesta, cahaya atau informasi sudah berjalan dari satu bagian langit malam ke sisi lainnya. Contoh, jika kita memandang radiasi gelombang mikro di satu arah, ia telah berjalan lebih dari 13 miliar semenjak *big bang*. Jika kita memutar kepala dan memandang ke arah berlawanan, kita melihat radiasi gelombang mikro yang identik yang juga telah berjalan lebih dari 13 miliar tahun. Karena mereka bersuhu sama, pasti mereka pernah berkontak termal di

permulaan masa. Tapi tak mungkin informasi telah berjalan dari titik-titik berlawanan di langit malam (terpisah lebih dari 26 miliar tahun-cahaya) sejak *big bang*.

Situasi semakin buruk jika kita memandangi langit 380.000 tahun pasca *big bang*, ketika radiasi latar pertama kali terbentuk. Jika kita memandang titik-titik berlawanan di langit, kita lihat radiasi latar hampir seragam. Tapi menurut kaikulasi dari teori *big bang*, titik-titik berlawanan ini terpisah 90 juta tahun-cahaya (lantaran perluasan ruang sejak ledakan). Tapi tak mungkin cahaya telah menempuh 90 juta tahun-cahaya dalam 380.000 tahun saja. Itu berarti informasi berjalan jauh lebih cepat daripada kecepatan cahaya, yang mana mustahil.

Menurut aturan, alam semesta semestinya terlihat kental, di mana satu bagian terlalu jauh untuk bersinggungan dengan bagian jauh lain. Bagaimana alam semesta bisa terlihat begitu seragam, padahal cahaya tidak punya cukup waktu untuk mencampur dan menyebar informasi dari satu bagian jauh ke bagian lain? (Fisikawan Princeton, Robert Dicke, menyebut ini sebagai persoalan horison, sebab horison merupakan titik terjauh yang dapat Anda lihat, titik terjauh yang dapat ditempuh cahaya.)

Tapi Guth sadar, inflasi juga menjadi kunci untuk menjelaskan persoalan ini. Dia beralasan, alam semesta tampak (*visible universe*) mungkin merupakan petak kecil di bola api awal. Petak itu sendiri mempunyai densitas dan suhu yang seragam. Tapi inflasi tiba-tiba mengembangkan petak kecil materi seragam ini sebesar faktor 1050,

jauh lebih cepat daripada kecepatan cahaya, sehingga alam semesta hari ini luar biasa seragam. Jadi alasan mengapa langit malam dan radiasi gelombang mikro begitu seragam adalah karena alam semesta tampak dahulunya merupakan petak bola api awal, kecil tapi seragam, yang mendadak berinflasi untuk menjadi alam semesta.

Reaksi Terhadap Inflasi

Walaupun Guth merasa yakin ide inflasi ini tepat, dia sedikit gugup saat mulai memberikan ceramah di depan khalayak. Ketika mempresentasikan teorinya pada 1980, "Saya masih cemas suatu konsekuensi dari teori ini mungkin salah besar. Juga ada kekhawatiran bahwa saya akan mengungkap status saya sebagai kosmolog yang masih hijau," akunya. Tapi teorinya begitu elegan dan hebat sehingga fisikawan di seluruh dunia segera melihat nilai pentingnya. Peraih Nobel Murray Gell-Mann berseru, "Kau telah memecahkan persoalan paling penting dalam kosmologi!" Peraih Nobel Sheldon Glashow mengutarakan rahasia kepada Guth bahwa Steven Weinberg "sangat geram" saat mendengar inflasi. Dengan gelisah Guth bertanya, "Apa Steve keberatan dengannya?" Glashow menjawab, "Tidak, dia hanya tidak terpikir akan hal itu." Bagaimana bisa mereka meluputkan solusi sedemikian sederhana, tanya para ilmuwan sendiri. Penerimaan terhadap teori Guth sangat antusias di kalangan fisikawan teoritis, yang terpesona oleh cakupannya.

Itu juga berdampak pada prospek kerja Guth. Suatu hari, lantaran pasar kerja yang ketat, kemungkinan menganggur tampak di depan

mata. "Saya berada dalam situasi marjinal di pasar kerja," akunya. Tiba-tiba tawaran pekerjaan mulai mengalir dari universitas-universitas top, tapi tidak dari pilihan pertamanya, MIT. Tapi kemudian dia membaca pepatah keberuntungan yang berbunyi, "Kesempatan menarik terbentang persis di depanmu bila kau tidak terlalu penakut." Ini memberinya keberanian untuk menelepon MIT dan menanyakan pekerjaan. Dia terkejut saat MIT menghubungi beberapa hari kemudian dan menawarinya jabatan guru besar. Pepatah keberuntungan yang dia baca berikutnya berbunyi, "Kau tak boleh bertindak atas dorongan hati." Tak mengindahkan nasehatnya, dia putuskan menerima jabatan MIT tersebut. "Lagipula apa yang diketahui pepatah keberuntungan China?" tanyanya pada diri sendiri.

Namun tetap ada masalah serius. Para astronom kurang terkesan oleh teori Guth, sebab ia tidak sempurna di satu bidang: ia memberi prediksi yang salah untuk Omega. Fakta bahwa Omega mendekati kira-kira 1 dapat dijelaskan oleh inflasi. Namun, inflasi bertindak terlalu jauh dan memprediksi Omega (atau Omega plus Lambda) semestinya tepat 1,0, sama dengan alam semesta flat. Pada tahun-tahun berikutnya, seiring kian banyak data eksperimen menemukan *dark matter* dalam jumlah besar di alam semesta, harga Omega sedikit bergeser, naik ke 0,3. Tapi ini masih berpotensi fatal untuk inflasi. Meski inflasi bisa menghasilkan lebih dari 3.000 makalah pada dekade berikutnya di kalangan fisikawan, ia terus menjadi barang aneh bagi astronom. Bagi mereka, data-data menyingkirkan inflasi.

Sebagian astronom diam-diam mengeluh bahwa fisikawan partikel

begitu terobsesi oleh keindahan inflasi sampai bersedia mengabaikan fakta eksperimen. (Astronom Robert Kirshner dari Harvard menulis, "Ide 'inflasi' ini terdengar gila. Fakta bahwa ia diambil serius oleh orang-orang yang duduk kokoh di kursi berkah tidak otomatis menjadikannya benar." Roger Penrose dari Oxford menyebut inflasi sebagai "mode yang dikenakan fisikawan *high-energy* kepada kosmolog...*Aardvark*[4] pun menganggap keturunannya sendiri cantik.")

Guth percaya, cepat atau lambat data akan menunjukkan alam semesta memang flat. Tapi yang betul-betul mengusiknya adalah gambaran awal miliknya menderita cacat kecil namun krusial, cacat yang belum dipahami lengkap sampai hari ini. Inflasi cocok untuk memecahkan serangkaian persoalan kosmologi yang mendalam. Masalahnya, dia tak tahu cara menghentikan inflasi.

Pikirkan pemanasan sepanci air hingga mencapai titik didihnya. Persis sebelum mendidih, sesaat ia berada dalam status energi tinggi. Ia ingin mendidih tapi tidak bisa, sebab diperlukan suatu ketidak-murnian untuk menghasilkan gelembung. Tapi sekali gelembung dihasilkan, ia cepat-cepat memasuki status energi rendah *true vacuum*, dan panci jadi penuh gelembung. Akhirnya, gelembung-gelembung menjadi demikian besar sehingga bergabung, sampai panci dipenuhi uap secara seragam. Begitu semua gelembung bergabung, selesailah fase transisi dari air menjadi uap.

Dalam gambaran awal Guth, masing-masing gelembung melam-bangkan sepotong alam semesta yang berinflasi dari kevakuman. Tapi

[4] Mamalia dengan moncong berbentuk pipa dan berlidah panjang, pemakan rayap —penj.

saat melakukan kalkulasi ini, dia mendapati gelembung-gelembung tidak bergabung secara benar, menyisakan alam semesta yang bergumpal hebat. Dengan kata lain, teorinya menyisakan panci penuh gelembung uap yang tak pernah cukup bergabung untuk menjadi panci uap seragam. Tangki air mendidih milik Guth tak pernah mereda menjadi alam semesta hari ini.

Pada 1981, Andrei Linde dari P. N. Lebedev Institute di Rusia dan Paul J. Steinhardt dan Andreas Albrecht, kala itu di Universitas Pennsylvania, menemukan jalan keluar dari teka-teki ini, menyadari bahwa jika gelembung tunggal *false vacuum* berinflasi cukup lama, akhirnya ia akan memenuhi seluruh panci dan menciptakan alam semesta seragam. Dengan kata lain, seluruh dunia kita boleh jadi merupakan produk sampingan gelembung tunggal yang berinflasi hingga memenuhi alam semesta. Anda tak perlu penggabungan banyak gelembung untuk menciptakan panci uap seragam. Satu gelembung akan cukup, jika ia berinflasi lumayan lama.

Pikirkan kembali analogi bendungan dan *false vacuum*. Semakin tebal bendungannya, semakin lama waktu yang air perlukan untuk menembus bendungan. Jika tembok bendungan cukup tebal, maka penembusan akan tertunda lama. Jika alam semesta dibiarkan berinflasi sebesar faktor 10^{50}, maka satu gelembung punya cukup waktu untuk memecahkan persoalan horison, persoalan keflatan, dan persoalan monokutub. Dengan kata lain, bila penembusan cukup tertunda, alam semesta akan berinflasi cukup lama hingga memflatkan alam semesta dan melemahkan monokutub. Tapi ini masih

menyisakan pertanyaan: mekanisme apa yang dapat memperpanjang inflasi sebesar itu?

Akhirnya, persoalan bandel ini dikenal sebagai *"graceful exit problem"*, yaitu bagaimana menginflasi alam semesta cukup lama agar gelembung tunggal dapat menghasilkan keseluruhan alam semesta. Selama bertahun-tahun, sekurangnya 50 mekanisme berbeda telah diajukan untuk memecahkan *graceful exit problem* ini. (Ini persoalan sulit. Saya sendiri sudah mencoba beberapa solusi. Relatif mudah untuk menghasilkan besaran inflasi sedang di alam semesta awal. Tapi yang teramat sulit adalah membuat alam semesta berinflasi sebesar faktor 10^{50}. Tentu saja, kita dapat menyelipkan faktor 10^{50} ini dengan tangan, tapi itu dibuat-buat dan dipaksakan.) Dengan kata lain, proses inflasi diyakini luas telah memecahkan persoalan monokutub, persoalan horison, dan persoalan keflatan, tapi tak ada yang tahu persis apa yang menggerakkan inflasi dan apa yang menghentikannya.

Inflasi Balau dan Alam Semesta Paralel

Fisikawan Andrei Linde, salah satunya, tidak terganggu oleh fakta bahwa tak ada yang sepakat tentang solusi *graceful exit problem*. Linde mengakui, "Saya cuma merasa, mustahil Tuhan tidak memanfaatkan kemungkinan sebagus itu untuk mempermudah pekerjaan-Nya."

Alhasil, Linde mengusulkan inflasi versi baru yang kelihatannya menghapus sebagian cacat dalam versi-versi terdahulu. Dia membayangkan alam semesta di mana, di titik-titik sembarang di ruang dan waktu, terjadi kerusakan spontan. Di tiap titik terjadinya

kerusakan, tercipta alam semesta yang berinflasi sedikit. Kebanyakan, besaran inflasinya kecil. Tapi karena proses ini sembarang, pada akhirnya akan ada gelembung di mana inflasi berlangsung cukup lama hingga menciptakan alam semesta kita. Kesimpulan logisnya, berarti inflasi berketerusan dan abadi, di mana *big bang-big bang* terjadi sepanjang waktu, di mana alam-alam semesta bertunas dari alam-alam semesta lain. Menurut gambaran ini, alam semesta dapat "berpucuk" menjadi alam semesta lain, menciptakan "multiverse".

Menurut teori ini, kerusakan spontan dapat terjadi di mana saja di alam semesta kita, memungkinkan sebuah alam semesta untuk berpucuk dari alam semesta kita. Ini juga berarti alam semesta kita sendiri mungkin berpucuk dari alam semesta sebelumnya. Dalam model inflasi balau, multiverse adalah abadi, meskipun alam-alam semesta individual tidak. Sebagian alam semesta mungkin mempunyai Omega amat besar, di mana mereka segera lenyap menuju *big crunch* pasca *big bang*. Sebagian alam semesta memiliki Omega teramat kecil dan mengembang selama-lamanya. Alhasil, multiverse didominasi oleh alam-alam semesta tersebut hingga berinflasi hebat.

Jika ditilik ke belakang, ide alam semesta paralel terpaksa kita ambil. Inflasi melambangkan penggabungan kosmologi tradisional dengan kemajuan fisika partikel. Sebagai teori quantum, fisika partikel menyatakan ada probabilitas terbatas untuk terjadinya peristiwa-peristiwa mustahil, semisal terciptanya alam-alam semesta paralel. Oleh karena itu, sekali mengakui kemungkinan terciptanya sebuah alam semesta, kita membuka pintu probabilitas terciptanya alam

semesta paralel dalam jumlah tiada akhir. Pikirkan, contohnya, bagaimana elektron digambarkan dalam teori quantum. Gara-gara ketidakpastian, elektron tidak eksis di satu titik, tapi eksis di semua titik potensial sekitar nukleus. "Awan" elektron yang melingkungi nukleus ini melambangkan elektron berada di banyak tempat pada waktu bersamaan. Ini merupakan dasar fundamental semua ilmu kimia yang memungkinkan elektron mengikat molekul. Alasan mengapa molekul-molekul kita tidak bubar adalah karena elektron-elektron paralel berdansa di sekeliling mereka dan menjaga kesatuan mereka. Demikian pula, dahulunya alam semesta lebih kecil daripada elektron. Jika kita menerapkan teori quantum pada alam semesta, maka terpaksa kita mengakui kemungkinan bahwa alam semesta eksis dalam banyak status secara serempak. Dengan kata lain, sekali membuka pintu penerapan fluktuasi quantum pada alam semesta, kita hampir terpaksa mengakui kemungkinan alam-alam semesta paralel. Tampaknya pilihan kita sedikit.

Alam Semesta Dari Kenihilan

Mulanya mungkin kita keberatan dengan gagasan multiverse, karena terasa melanggar hukum-hukum yang dikenal, seperti kekekalan materi dan energi. Padahal kandungan total materi/energi alam semesta mungkin sebetulnya sangat kecil. Kandungan materi alam semesta, meliputi semua bintang, planet, dan galaksi, adalah sangat besar dan positif. Namun, energi yang tersimpan dalam gravitasi mungkin negatif. Bila Anda menambahkan energi positif (materi) pada

energi negatif (gravitasi), jumlahnya boleh jadi mendekati nol! Sedikit-banyak, *alam-alam semesta demikian adalah kosong*. Mereka dapat timbul dari kevakuman hampir tanpa susah-payah. (Jika alam semesta tertutup, maka kandungan total energi alam semesta pasti persis nol.)

(Untuk memahami ini, bayangkan seekor keledai yang jatuh ke dalam lubang besar di tanah. Kita harus menambah energi pada keledai dalam rangka menariknya keluar dari lubang. Sekali keluar dan berdiri di tanah, dia dianggap memiliki energi nol. Jadi, karena kita harus menambah energi pada keledai untuk membawanya ke status energi nol, dia harus memiliki energi negatif selagi di dalam lubang. Demikian pula halnya, perlu energi untuk menarik planet dari tata surya. Sekali keluar dan berada di angkasa bebas, ia memiliki energi nol. Karena kita harus menambahkan energi untuk mengeluarkan planet dari tata surya hingga mencapai status energi nol, ia memiliki energi gravitasi negatif selagi di dalam tata surya.)

Bahkan, untuk menciptakan alam semesta seperti milik kita diperlukan materi dalam jumlah netto sangat kecil, barangkali satu ons. Seperti yang gemar Guth ucapkan, "Mungkin alam semesta adalah makan siang gratis." Ide penciptaan alam semesta dari kenihilan ini pertama kali diperkenalkan oleh fisikawan Edward Tryon dari Hunter College, City University of New York, dalam sebuah makalah yang dipublikasikan di majalah *Nature* pada 1973. Dia berspekulasi, alam semesta adalah sesuatu "yang terjadi dari waktu ke waktu" akibat fluktuasi quantum dalam kevakuman. (Kendati jumlah netto materi yang diperlukan untuk menciptakan alam semesta boleh jadi

mendekati nol, materi ini harus termampatkan hingga densitas luar biasa, sebagaimana akan kita simak di bab 12.)

Seperti mitologi P'an Ku, ini merupakan contoh kosmologi *creatio ex nihilo*. Meski teori alam semesta-dari-kenihilan tidak bisa dibuktikan dengan cara-cara konvensional, ia betul-betul membantu menjawab pertanyaan-pertanyaan praktis tentang alam semesta. Misalnya, mengapa alam semesta tidak berputar? Segala sesuatu yang kita lihat di sekitar kita berputar, mulai dari gasing, badai, planet, galaksi, hingga quasar. Ini seperti karakteristik khas materi di alam semesta. Tapi alam semesta sendiri tidak berputar. Ketika kita memandang galaksi-galaksi di angkasa, putaran total mereka setara dengan nol. (Ini sungguh menguntungkan sebab, sebagaimana akan kita simak di bab 5, jika alam semesta betul-betul berputar, maka perjalanan waktu akan menjadi lumrah dan sejarah akan mustahil untuk ditulis.) Alasan mengapa alam semesta tidak berputar adalah mungkin karena alam semesta kita berasal dari kenihilan. Karena kevakuman tidak berputar, jangan harap kita melihat putaran netto timbul di alam semesta kita. Bahkan semua gelembung alam semesta di dalam multiverse barangkali memiliki putaran netto nol.

Mengapa muatan listrik positif dan negatif persis seimbang? Umumnya, saat memikirkan gaya kosmik yang mengatur alam semesta, kita lebih memikirkan gravitasi ketimbang gaya elektromagnet, sungguhpun gaya gravitasi sangat kecil dibanding gaya elektromagnet. Penyebab hal ini adalah keseimbangan sempurna antara muatan positif dan negatif. Alhasil, muatan netto alam semesta

kelihatan nol, dan gravitasi mendominasi alam semesta, bukan gaya elektromagnet.

Walaupun sudah dianggap biasa, kesetaraan muatan positif dan negatif sungguh luar biasa, dan telah dicek melalui eksperimen hingga 1 per 10^{21}. (Tentu saja, terdapat ketidakseimbangan lokal di antara muatan-muatan, dan itu sebabnya ada petir. Tapi jumlah total muatan, bahkan untuk hujan angin disertai petir dan guruh, berjumlah nol.) Bila terdapat selisih 0,00001 persen saja pada muatan netto listrik positif dan negatif dalam tubuh Anda, Anda akan terkoyak-koyak seketika, bagian-bagian tubuh Anda terlempar ke angkasa luar oleh gaya listrik.)

Jawaban untuk teka-teki abadi ini adalah mungkin alam semesta berasal dari kenihilan. Karena kevakuman memiliki putaran dan muatan netto nol, bayi alam semesta yang muncul dari kenihilan juga harus memiliki putaran dan muatan netto nol.

Ada satu pengecualian nyata dalam aturan ini. Yaitu bahwa alam semesta terbuat dari materi ketimbang antimateri. Karena materi dan antimateri berlawanan (antimateri memiliki muatan persis berlawanan dengan materi), kita boleh berasumsi *big bang* telah menghasilkan materi dan antimateri dalam jumlah setara. Tapi masalahnya, materi dan antimateri akan saling menghancurkan menjadi semburan sinar gamma bila bersentuhan. Dengan demikian, semestinya kita tidak eksis. Alam semesta semestinya menjadi kumpulan acak sinar gamma, bukan disesaki materi biasa. Jika *big bang* simetris sempurna (atau jika ia berasal dari kenihilan), maka kita

menduga materi dan antimateri dalam jumlah setara terbentuk. Lantas mengapa kita eksis? Solusi yang diajukan oleh fisikawan Rusia, Andrei Sakharov, adalah bahwa *big bang* awal tidak simetris sempurna. Terdapat sedikit kerusakan kesimetrian antara materi dan antimateri di jenak penciptaan, sehingga materi mendominasi dibanding antimateri, yang memungkinkan alam semesta kita ini terwujud. (Kesimetrian yang rusak saat *big bang* disebut *CP symmetry*, kesimetrian yang membalik muatan dan paritas partikel materi dan antimateri.) Jika alam semesta berasal dari "kenihilan", maka barangkali kenihilan tersebut tidak hampa sempurna, melainkan mengandung sedikit kerusakan kesimetrian, yang memungkinkan dominasi materi sedikit di atas antimateri hari ini. Sumber kerusakan kesimetrian ini masih belum dipahami.

Seperti Apa Alam Semesta Lain Itu?

Ide multiverse sangat menarik, karena kita tinggal berasumsi kerusakan spontan terjadi secara sembarang. Tak perlu dibuat asumsi lain. Setiap kali sebuah alam semesta bertunas dari alam semesta lain, konstanta fisikalnya berbeda dari yang asli, menghasilkan hukum fisika baru. Jika ini benar, maka realitas baru dapat muncul di setiap alam semesta. Tapi ini menimbulkan pertanyaan yang menggugah rasa ingin tahu: seperti apa wujud alam-alam semesta lain ini? Kunci untuk memahami fisika alam semesta paralel adalah memahami bagaimana alam semesta tercipta, dengan kata lain, memahami bagaimana persisnya kerusakan spontan terjadi.

Ketika sebuah alam semesta terlahir dan kerusakan spontan terjadi, ini juga merusak kesimetrian teori awal. Bagi seorang fisikawan, keindahan berarti kesimetrian dan kesederhanaan. Jika sebuah teori dikatakan indah, artinya ia memiliki kesimetrian kuat yang dapat menjelaskan sekumpulan besar data dengan cara paling kompak dan hemat. Lebih tepatnya, sebuah persamaan dianggap indah jika ia tetap sama manakala kita mempertukarkan komponen-komponen di antara mereka. Satu manfaat besar dari penemuan kesimetrian tersembunyi alam raya adalah kita dapat menunjukkan bahwa fenomena-fenomena yang tampak berbeda sebetulnya merupakan manifestasi dari hal yang sama, terjalin bersama oleh kesimetrian. Contoh, kita bisa tunjukkan listrik dan magnetisme sebetulnya merupakan dua aspek dari objek yang sama, karena terdapat kesimetrian yang dapat mempertukarkan mereka dalam persamaan Maxwell. Demikian pula, Einstein menunjukkan relativitas dapat mengubah ruang menjadi waktu dan sebaliknya, karena mereka adalah bagian dari objek yang sama, struktur ruang-waktu.

Pikirkan kepingan salju, yang mempunyai kesimetrian indah 6-lipat, sumber kekaguman tiada akhir. Esensi keindahannya adalah ia tetap sama bila kita putar sebesar 60 derajat. Ini berarti pula bahwa setiap persamaan yang kita tuliskan untuk menggambarkan kepingan salju tersebut semestinya mencerminkan fakta ini, bahwa ia tetap tak berubah dengan rotasi kelipatan 60 derajat. Secara matematis, kita katakan kepingan salju tersebut memiliki kesimetrian C_6.

Dengan demikian kesimetrian menyandikan keindahan tersem-

bunyi alam raya. Tapi nyatanya, hari ini kesimetrian-kesimetrian ini rusak parah. Empat gaya besar alam semesta tidak saling serupa sama sekali. Bahkan, alam semesta penuh dengan ketidakteraturan dan cacat; di sekeliling kita terdapat pecahan dan serpihan kesimetrian purba awal yang diremukkan oleh *big bang*. Jadi, kunci untuk memahami alam-alam semesta paralel potensial adalah dengan memahami "kerusakan kesimetrian"—yaitu, bagaimana kesimetrian ini rusak pasca *big bang*. Sebagaimana kata fisikawan David Gross, "Rahasia alam adalah kesimetrian, tapi banyak dari tekstur dunia disebabkan oleh mekanisme kerusakan kesimetrian."

Pikirkan bagaimana cermin indah remuk menjadi ribuan keping. Cermin awal memiliki kesimetrian hebat. Anda dapat memutar cermin dengan sudut berapapun dan ia tetap memantulkan cahaya ke arah yang sama. Tapi setelah ia remuk, kesimetrian awal rusak. Menetapkan bagaimana persisnya kesimetrian rusak [sama dengan] menetapkan bagaimana cermin tersebut remuk.

Kerusakan Kesimetrian

Untuk memahami hal ini, pikirkan perkembangan embrio. Di tahap awalnya, beberapa hari pasca pembuahan, embrio terdiri dari sel-sel berbentuk bulat sempurna. Tiap sel tak berbeda dari yang lain. Terlihat sama tak peduli bagaimana kita memutarnya. Fisikawan menyebut embrio di tahap ini mempunyai kesimetrian $O(3)$—dengan kata lain, ia tetap sama tak peduli bagaimana Anda memutarnya pada suatu poros.

Walaupun indah dan anggun, embrio juga agak tak bermanfaat. Berbentuk bulat sempurna, ia tidak dapat melakukan fungsi berguna atau berinteraksi dengan lingkungan. Bagaimanapun, pada waktunya, kesimetrian embrio ini rusak, menumbuhkan kepala kecil dan batang tubuh, hingga menyerupai gada. Meski kini kesimetrian bulat awal rusak, embrio masih memiliki sisa kesimetrian; ia tetap sama bila kita putar sepanjang porosnya. Dengan demikian, ia punya kesimetrian silindris. Secara matematis, kini kita katakan $O(3)$ bulat awal telah rusak menjadi kesimetrian $O(2)$ silinder.

Namun, kerusakan kesimetrian $O(3)$ dapat berlangsung dengan cara lain. Bintang laut, misalnya, tidak punya kesimetrian silindris atau bilateral; malahan, ketika kesimetrian bulat rusak, mereka memiliki kesimetrian C_5 (yang tetap sama di bawah rotasi sebesar 72 derajat), memberinya bentuk bintang bermata lima. Oleh sebab itu, cara rusaknya kesimetrian $O(3)$ menentukan bentuk organisme saat terlahir.

Demikian pula, para ilmuwan yakin alam semesta berawal dengan kondisi kesimetrian sempurna, di mana semua gaya bersatu dalam gaya tunggal. Alam semesta ini indah, simetris, tapi agak tak bermanfaat. Kehidupan yang kita kenal tidak dapat eksis di kondisi sempurna ini. Agar kehidupan dapat eksis, kesimetrian alam semesta harus rusak selagi ia mendingin.

Kesimetrian dan Standard Model

Dengan cara yang sama, untuk memahami seperti apa tampilan alam

semesta paralel, pertama-tama kita harus memahami kesimetrian kuat, kesimetrian lemah, dan interaksi elektromagnet. Gaya nuklir kuat, contohnya, didasarkan pada 3 quark, yang dilabeli oleh para ilmuwan dengan memberi mereka "warna" fiktif (contohnya, merah, putih, dan biru). Kita ingin persamaan tetap sama bila kita menukar tempat 3 quark berwarna ini. Kita katakan persamaan ini mempunyai kesimetrian $SU(3)$, artinya, bila kita rombak susunan ketiga quark, persamaan ini tetap sama. Ilmuwan yakin, sebuah teori dengan kesimetrian $SU(3)$ merupakan deskripsi paling akurat tentang interaksi kuat (disebut Kromodinamika Quantum). Seandainya kita punya superkomputer raksasa, dimulai dengan massa quark dan kekuatan interaksi mereka saja, secara teori kita dapat mengkalkulasi semua atribut proton dan neutron dan semua karakteristik fisika nuklir.

Demikian pula, katakanlah kita punya 2 lepton, yakni elektron dan neutrino. Jika kita tukar tempat mereka dalam sebuah persamaan, kita memperoleh kesimetrian $SU(2)$. Kita juga dapat memasukkan cahaya, yang memiliki kelompok kesimetrian $U(1)$. (Kelompok kesimetrian ini mengocok beragam komponen atau polarisasi cahaya di antara satu sama lain.) Dengan demikian, kelompok kesimetrian interaksi lemah dan elektromagnet adalah $SU(2) \times U(1)$.

Jika cukup merekatkan ketiga teori ini menjadi satu, tak heran kita mendapat kesimetrian $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, dengan kata lain, ini adalah kesimetrian yang secara terpisah mencampur 3 quark di antara mereka dan 2 lepton di antara mereka (tapi tidak mencampur quark dengan lepton). Teori yang dihasilkan adalah Standard Model, yang,

sebagaimana kita simak di awal, barangkali termasuk teori tersukses sepanjang masa. Seperti dikatakan Gordon Kane dari Universitas Michigan, "Segala sesuatu yang terjadi di dunia kita (kecuali efek gravitasi) diakibatkan oleh interaksi partikel Standard Model." Beberapa prediksi teori ini telah diuji di laboratorium hingga marjin 1 per 100 juta. (Kenyataannya, dua puluh Hadiah Nobel telah dianugerahkan kepada fisikawan yang menyatukan bagian-bagian Standard Model.)

Pada akhirnya, kita dapat menyusun sebuah teori yang mengkombinasikan interaksi kuat, interaksi lemah, dan interaksi elektromagnet ke dalam kesimetrian tunggal. Teori GUT paling sederhana yang mampu melakukan ini mempertukarkan kelima partikel (3 quark dan 2 lepton) dengan satu sama lain secara simultan. Berbeda dari kesimetrian Standard Model, kesimetrian GUT dapat mencampur quark dan lepton (artinya proton dapat meluruh menjadi elektron). Dengan kata lain, teori GUT mengandung kesimetrian $SU(5)$ (mengubah susunan kelima partikel—3 quark dan 2 lepton—di antara mereka). Setelah bertahun-tahun, banyak kelompok kesimetrian lain telah dianalisa, tapi barangkali $SU(5)$ merupakan kelompok terendah yang cocok dengan data.

Ketika kerusakan spontan terjadi, kesimetrian GUT awal dapat rusak dalam beberapa cara. Dalam satu cara, kesimetrian GUT rusak menjadi $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ diiringi 19 parameter bebas yang kita butuhkan untuk menggambarkan alam semesta. Ini memberi kita alam semesta yang dikenal. Namun, sebetulnya ada banyak cara untuk

merusak kesimetrian GUT. Alam-alam semesta lain kemungkinan besar memiliki sisa kesimetrian yang berbeda sama sekali. Minimal, alam semesta paralel ini memiliki harga 19 parameter yang berbeda. Dengan kata lain, kekuatan berbagai gaya akan berbeda di alam semesta lain tersebut, mengakibatkan perubahan besar pada struktur alam semesta. Dengan memperlemah kekuatan gaya nuklir, contohnya, kita dapat mencegah pembentukan bintang-bintang, membiarkan alam semesta gelap abadi, membuat kehidupan jadi mustahil. Jika gaya nuklir diperkuat terlalu banyak, bintang-bintang bisa membakar bahan bakar nuklir mereka terlalu cepat sehingga kehidupan takkan sempat terbentuk.

Kelompok kesimetrian juga dapat berubah, menciptakan alam semesta partikel yang berbeda sama sekali. Di beberapa alam semesta ini, proton mungkin tidak stabil dan akan cepat meluruh jadi anti-elektron. Alam semesta seperti itu tidak dapat memiliki kehidupan, melainkan akan cepat berdisintegrasi menjadi kabut tak bernyawa berisi elektron dan neutrino. Alam semesta lain dapat merusak kesimetrian GUT dalam cara lain lagi, di mana ada lebih banyak partikel stabil, semisal proton. Di alam semesta demikian mungkin terdapat beraneka ragam unsur kimiawi baru dan aneh. Kehidupan di alam semesta tersebut boleh jadi lebih kompleks daripada alam semesta kita, dengan lebih banyak unsur kimiawi untuk menciptakan bahan kimiawi mirip DNA.

Kita juga dapat merusak kesimetrian awal GUT agar memperoleh lebih dari satu kesimetrian $U(1)$, sehingga ada lebih dari satu bentuk

cahaya. Ini adalah alam semesta yang aneh, di mana makhluk-makhluk dapat "melihat" bukan dengan satu jenis cahaya saja, tapi beberapa. Di alam semesta demikian, mata makhluk hidup mungkin mempunyai beraneka ragam reseptor untuk mendeteksi berbagai bentuk radiasi mirip cahaya.

Tak heran, terdapat ratusan cara, bahkan mungkin tak terhingga, untuk merusak kesimetrian-kesimetrian ini. Tiap-tiap solusi ini, pada gilirannya, dapat disamakan dengan alam semesta tersendiri.

Prediksi yang Bisa Diuji

Sayangnya, kemungkinan pengujian teori multiverse, melibatkan banyak alam semesta dengan perangkat hukum fisika berlainan, saat ini mustahil. Kita harus berjalan lebih cepat daripada cahaya untuk menjangkau alam semesta lain ini. Tapi manfaat teori inflasi adalah ia membuat prediksi tentang sifat alam semesta kita yang *bisa* diuji.

Karena teori inflasi merupakan sebuah teori quantum, ia didasarkan pada prinsip ketidakpastian Heisenberg, batu pijak teori quantum. (Prinsip ketidakpastian menyatakan Anda tidak dapat melakukan pengukuran dengan akurasi tak terhingga, misalnya mengukur kecepatan dan posisi elektron. Tak peduli seberapa peka instrumen Anda, akan selalu terdapat ketidakpastian dalam pengukuran Anda. Jika Anda mengetahui kecepatan elektron, Anda tidak dapat mengetahui lokasinya; jika Anda mengetahui lokasinya, Anda tidak dapat mengetahui kecepatannya.) Diterapkan pada bola api awal yang memicu *big bang*, berarti ledakan kosmik awal tidak

mungkin "lembut" tak terhingga. (Jika ia seragam sempurna, maka kita akan tahu persis trayektori partikel subatom yang keluar dari *big bang*, yang mana melanggar prinsip ketidakpastian.) Teori quantum memperkenankan kita mengkomputasi ukuran riak atau fluktuasi pada bola api awal ini. Jika kemudian riak quantum kecil ini dipompa, kita dapat mengkalkulasi jumlah minimum riak yang semestinya kita lihat pada gelombang mikro latar 380.000 tahun pasca *big bang*. (Dan jika kita kembangkan riak-riak tersebut sampai hari ini, semestinya kita menemukan distribusi gugus galaksi yang sekarang. Galaksi kita sendiri berawal dari salah satu fluktuasi kecil ini.)

Awalnya, pandangan sepintas terhadap data satelit COBE tidak menemukan penyimpangan atau fluktuasi pada gelombang mikro latar. Ini menimbulkan kegelisahan di kalangan fisikawan, sebab gelombang mikro latar yang lembut sempurna bukan cuma akan melanggar inflasi, tapi juga teori quantum secara keseluruhan, melanggar prinsip ketidakpastian. Itu akan menggoncang fisika sampai ke akarnya. Seluruh fondasi fisika quantum abad 20 mungkin harus dibuang.

Ilmuwan merasa lega ketika peninjauan detil dan seksama terhadap data satelit COBE yang disempurnakan komputer menemukan sekumpulan riak remang, selisih temperatur 1 per 100.000—besaran penyimpangan minimum yang ditoleransi oleh teori quantum. Riak-riak amat kecil ini konsisten dengan teori inflasi. Guth mengakui, "Saya sungguh terperdaya oleh radiasi kosmik latar. Sinyalnya begitu lemah, bahkan tidak terdeteksi sampai tahun 1965,

dan kini mereka sedang mengukur fluktuasi 1 per 100.000."

Kendati bukti eksperimen yang tengah dikumpulkan lambat-laun menyokong inflasi, para ilmuwan masih harus memecahkan persoalan bandel harga Omega—fakta bahwa Omega berharga 0,3, bukan 1,0.

Supernova—Kembalinya Lambda

Saat diketahui inflasi ternyata konsisten dengan data COBE yang dihimpun ilmuwan, astronom masih menggerutu di tahun 1990-an bahwa inflasi melanggar data eksperimen Omega secara mencolok. Kecenderungan ini mulai berbalik pada 1998, berkat data yang diperoleh dari arah tak disangka-sangka. Astronom mencoba mengkalkulasi ulang laju perluasan alam semesta di masa lampau. Bukannya menganalisa variabel-variabel Cepheid, sebagaimana dilakukan Hubble pada 1920-an, mereka mulai menyelidiki supernova di galaksi-galaksi jauh miliaran tahun-cahaya ke masa lampau. Mereka menyelidiki khususnya supernova tipe Ia, yang ideal untuk dipakai sebagai lilin standar.

Astronom tahu, supernova tipe ini memiliki kecerlangan yang hampir sama. (Kecerlangan supernova tipe Ia sudah dikenal dengan baik sehingga penyimpangan kecil pun dapat dikalibrasi: semakin cerlang supernovanya, semakin lambat kecerlangannya merosot.) Supernova demikian timbul ketika bintang kerdil putih dalam sistem biner mengisap materi secara perlahan dari bintang rekannya. Dengan hidup dari bintang saudaranya, massa bintang kerdil putih ini berangsur tumbuh hingga mencapai berat 1,4 massa surya, batas

maksimum untuk sebuah bintang kerdil putih. Begitu melampaui batas ini, mereka kolaps dan meledak dalam wujud supernova tipe Ia. Titik picu inilah yang menjadi alasan mengapa supernova-supernova tipe Ia begitu seragam dalam hal kecerlangan—ini adalah hasil wajar dari bintang-bintang kerdil putih yang mencapai massa tepat dan lantas kolaps akibat gravitasi. (Sebagaimana ditunjukkan oleh Subrahmanyan Chandrasekhar di tahun 1935, pada bintang kerdil putih, gaya gravitasi yang menggumalkan bintang tersebut diimbangi oleh gaya tolak di antara elektron-elektron, disebut *electron degeneracy pressure*. Bila bintang kerdil putih memiliki berat lebih dari 1,4 massa surya, maka gravitasi mengatasi gaya ini dan bintang pun tergumal, menghasilkan supernova.) Karena supernova jauh terjadi di alam semesta awal, dengan menganalisanya kita dapat mengkalkulasi laju perluasan alam semesta miliaran tahun silam.

Dua kelompok astronom terpisah (dipimpin oleh Saul Perlmutter dari Supernova Cosmology Project dan Brian P. Schmidt dari High-Z Supernova Search Team) menyangka akan mendapati alam semesta sedang berangsur melambat, walaupun masih mengembang. Selama beberapa generasi astronom, ini menjadi pasal keyakinan, diajarkan di setiap pelajaran kosmologi—bahwa perluasan awal sedang berangsur melambat.

Setelah menganalisa selusinan supernova, masing-masing menemukan bahwa alam semesta awal tidak mengembang secepat perkiraan sebelumnya (ingsutan merah supernova dan kecepatan mereka lebih kecil daripada dugaan semula). Saat membandingkan laju perluasan

alam semesta awal dengan perluasan hari ini, mereka menyimpulkan laju perluasan hari ini relatif lebih tinggi. Syok, dua kelompok ini sampai pada kesimpulan bahwa alam semesta sedang *berakselerasi.*

Cemas, mereka rasa mustahil mencocokkan data dengan harga Omega berapapun. Satu-satunya cara untuk membuat data cocok dengan teori adalah memperkenalkan ulang Lambda, energi vakum yang pertama kali diperkenalkan oleh Einstein. Lebih jauh, mereka mendapati ternyata Omega dikalahkan oleh Lambda amat besar yang menyebabkan alam semesta berakselerasi dalam perluasan tipe de Sitter. Kedua kelompok itu secara terpisah sampai pada kesadaran mengagetkan ini tapi ragu untuk mempublikasikan temuan mereka lantaran adanya praduga historis kuat bahwa harga Lambda adalah nol. Sebagaimana dikatakan George Jacoby dari Kitt's Peak Observatory, "Lambda telah senantiasa menjadi konsep bermata liar, dan siapapun yang cukup gila untuk menyebutnya tidak nol dianggap sebagai orang sinting."

Schmidt mengenang, "Saya masih menggelengkan kepala, tapi kami sudah mengecek segalanya... Saya segan sekali memberitahu orang-orang, sebab saya betul-betul menyangka kami akan dibantai." Namun, ketika kedua kelompok melansir hasil temuan mereka pada 1998, gunung data terjal yang mereka kumpulkan tidak bisa ditolak begitu saja. Lambda, "blunder terbesar" Einstein, yang hampir terlupakan dalam kosmologi modern, kini sedang menggelar kemunculan ulang fantastis setelah 90 tahun tidak dikenal!

Fisikawan tercengang. Edward Witten dari Institute for Advanced

Study di Princeton berkata itu adalah "penemuan eksperimen teraneh sejak saya menggeluti fisika." Ketika harga Omega, 0,3, ditambahkan pada harga Lambda, 0,7, jumlahnya adalah (di bawah marjin galat eksperimen) sama dengan 1,0, sesuai prediksi teori inflasi. Seperti puzzle jigsaw yang dirangkai di depan mata kita, kosmolog sedang menyaksikan potongan inflasi yang hilang. Ia berasal dari kevakuman itu sendiri.

Hasil ini dikonfirmasi ulang secara spektakuler oleh satelit WMAP, yang menunjukkan bahwa energi terkait Lambda, atau *dark energy*, menyusun 73% dari semua materi dan energi di alam semesta, menjadikannya potongan puzzle jigsaw yang dominan.

Fase Alam Semesta

Barangkali kontribusi terbesar satelit WMAP adalah ia memberi ilmuwan keyakinan bahwa mereka sedang menuju "Standard Model" kosmologi. Kendati masih terdapat jurang lebar, astrofisikawan mulai melihat garis besar suatu teori standar muncul dari data. Menurut gambaran yang kita susun, evolusi alam semesta berjalan dalam tahap-tahap berbeda selagi ia mendingin. Transisi dari tahap-tahap ini melambangkan kerusakan kesimetrian dan keberpisahan gaya alam. Berikut adalah fase-fase dan tonggak penting yang kita ketahui hari ini:

1. Sebelum 10^{-43} detik – era Planck

Hampir tak ada yang pasti seputar era Planck. Pada energi Planck (10^{19} miliar eV), gaya gravitasi sama kuatnya dengan gaya quantum

lain. Alhasil, empat gaya alam semesta mungkin bersatu dalam "supergaya" tunggal. Barangkali saat itu alam semesta eksis di fase "kenihilan" sempurna, atau ruang hampa berdimensi lebih tinggi. Kesimetrian misterius yang mencampur keempat gaya, mengakibatkan persamaan-persamaannya tetap sama, kemungkinan besar adalah "supersimetri" (untuk pembahasan supersimetri, lihat bab 7). Dengan sebab yang tidak diketahui, kesimetrian misterius yang menyatukan keempat gaya ini rusak, dan terbentuklah gelembung kecil, embrio alam semesta kita, mungkin hasil dari fluktuasi quantum sembarang. Gelembung ini seukuran "panjang Planck", yakni 10^{-33} cm.

2. 10^{-43} detik – era GUT

Kerusakan kesimetrian terjadi, menciptakan gelembung yang mengembang pesat. Selagi gelembung berinflasi, keempat gaya fundamental berpisah cepat dari satu sama lain. Gravitasi adalah gaya pertama yang terpisah dari tiga gaya lain, melepaskan gelombang kejut ke seluruh alam semesta. Kesimetrian awal supergaya itu rusak menjadi kesimetrian kecil, mungkin memuat kesimetrian GUT $SU(5)$. Interaksi kuat, interaksi lemah, dan interaksi elektromagnet yang tersisa masih disatukan oleh kesimetrian GUT ini. Selama fase ini Alam semesta berinflasi sebesar faktor luar biasa, kira-kira 10^{50}, dengan sebab yang tidak dimengerti, membuat ruang mengembang jauh lebih cepat daripada kecepatan cahaya. Suhunya 10^{32} derajat.

3. 10^{-34} detik – akhir inflasi

Suhu jatuh ke 10^{27} derajat karena gaya nuklir kuat berpisah dari dua gaya lain. (Kelompok kesimetrian GUT rusak menjadi $SU(3) \times SU(2)$

× $U(1)$.) Periode inflasi berakhir, memperkenankan alam semesta meluncur dalam perluasan standar Friedmann. Alam semesta terdiri dari "sup" plasma panas berisi quark, gluon, dan lepton. Quark-quark yang bebas berkondensasi menjadi proton dan neutron masa kini. Alam semesta masih sangat kecil, hanya seukuran tata surya hari ini. Materi dan antimateri musnah, tapi kelebihan tipis jumlah materi di atas antimateri (1 per 1 miliar) menyisakan materi yang kita lihat di sekitar kita sekarang. (Kisaran energi inilah yang kita harapkan dapat ditiru dalam beberapa tahun ke depan oleh akselerator partikel di Large Hadron Collider.)

4. 3 menit – nukleus terbentuk

Suhu jatuh cukup banyak bagi terbentuknya nukleus tanpa terkoyak oleh panas hebat. Hidrogen berfusi menjadi helium (menghasilkan rasio 75% hidrogen/25% helium di masa kini). Sejumlah kecil litium terbentuk, tapi fusi unsur-unsur lebih tinggi berhenti karena nuklues dengan 5 partikel terlalu tidak stabil. Alam semesta menjadi buram, cahaya dipencarkan oleh elektron-elektron bebas. Ini menandai akhir bola api purba.

5. 380.000 tahun – atom terlahir

Suhu jatuh ke 3.000 derajat Kelvin. Atom terbentuk karena elektron menetap di sekitar nukleus tanpa dikoyak oleh panas. Kini foton dapat berjalan bebas tanpa diserap. Ini merupakan radiasi yang dideteksi oleh COBE dan WMAP. Alam semesta, yang sebelumnya buram dan dipenuhi plasma, kini jadi transparan. Angkasa, alih-alih putih, kini jadi hitam.

6. 1 miliar tahun – bintang berkondensasi

Suhu jatuh ke 18 derajat. Quasar, galaksi, dan gugus galaksi mulai berkondensasi, mayoritas sebagai produk sampingan dari riak-riak quantum kecil di bola api asal. Bintang-bintang mulai "memasak" unsur-unsur ringan, seperti karbon, oksigen, dan nitrogen. Bintang yang meledak memuntahkan unsur-unsur selain besi ke angkasa. Ini adalah era terjauh yang dapat diperiksa oleh teleskop antariksa Hubble.

7. 6,5 miliar tahun – perluasan de Sitter

Perluasan Friedmann berangsur berakhir, dan alam semesta mulai berakselerasi dan memasuki fase akselerasi, disebut perluasan de Sitter, didorong oleh gaya antigravitasi misterius yang belum dimengerti.

8. 13,7 miliar tahun – hari ini

Masa kini. Suhu telah jatuh ke 2,7 derajat. Kita menyaksikan alam semesta masa kini yang berisi galaksi, bintang, dan planet. Alam semesta masih terus berakselerasi dengan mode tak terkendali.

Masa Depan

Walaupun hari ini teori inflasi punya kemampuan untuk menjelaskan sedemikian banyak misteri alam semesta, ini tidak membuktikan teori tersebut benar. (Di samping itu, belakangan ini diusulkan teori-teori saingan, sebagaimana akan kita simak di bab 7.) Hasil penemuan supernova harus dicek dan dan diricek, memperhitungkan faktor-

faktor seperti debu dan anomali pada produksi supernova. Bukti kuat yang pada akhirnya akan mentahkik atau menyangkal skenario inflasi adalah "gelombang gravitasi" yang dihasilkan di jenak *big bang*. Gelombang-gelombang gravitasi ini, seperti gelombang mikro latar, semestinya masih bergema di seluruh alam semesta dan mungkin sebetulnya dapat ditemukan oleh detektor gelombang gravitasi, sebagaimana akan kita bahas di bab 9. Inflasi membuat prediksi rinci mengenai sifat gelombang gravitasi ini, dan detektor gelombang gravitasi semestinya menemukan mereka.

Tapi salah satu prediksi inflasi yang paling menarik tidak dapat diuji secara langsung, yaitu eksistensi "bayi alam semesta" yang eksis di multiverse berisi alam-alam semesta, masing-masing mematuhi perangkat hukum fisika yang sedikit berbeda. Untuk memahami implikasi penuh dari multiverse, pertama-tama penting dipahami bahwa inflasi memanfaatkan penuh konsekuensi ganjil persamaan Einstein maupun teori quantum. Dalam teori Einstein, kita punya kemungkinan eksistensi banyak alam semesta, dan dalam teori quantum, kita punya kemungkinan cara penerowongan di antara alam-alam semesta tersebut. Dan dalam kerangka baru bernama Teori-M, kita mungkin punya teori final yang dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan seputar alam semesta paralel dan perjalanan waktu, untuk penghabisan.

BAGIAN 2
Multiverse

Bab 5
Portal Dimensi dan Perjalanan Waktu

Di dalam setiap *black hole* yang kolaps mungkin terdapat benih-benih alam semesta mengembang yang baru.

—Sir Martin Rees

Black hole mungkin celah menuju waktu lain. Diduga, seandainya terjerembab ke *black hole,* kita akan muncul kembali di bagian lain alam semesta dan di zaman lain... Barangkali *black hole* merupakan jalan masuk menuju Negeri Ajaib. Tapi apakah di sana ada Alice atau kelinci-kelinci putih?

—Carl Sagan

Relativitas Umum mirip dengan kuda Troya. Di permukaan, teori ini anggun. Dengan beberapa asumsi sederhana, seseorang bisa memperoleh fitur-fitur umum kosmos, termasuk penekukan cahaya bintang dan *big bang* itu sendiri, yang kesemuanya telah diukur hingga akurasi mengagumkan. Bahkan inflasi dapat diakomodasi bila kita, dengan tangan, menyisipkan sebuah konstanta kosmologis ke alam semesta awal. Solusi-solusi ini memberi kita teori paling memaksa perihal kelahiran dan kematian alam semesta.

Tapi tersembunyi di dalam kuda itu, kita temukan semua jenis roh jahat dan goblin, meliputi *black hole, white hole, wormhole*, dan bahkan mesin waktu, yang bertentangan dengan akal sehat. Anomali-anomali ini dianggap begitu ganjil, sampai Einstein sendiri berpikir mereka takkan pernah dijumpai di alam. Selama bertahun-tahun, dia berusaha keras memerangi solusi-solusi aneh ini. Hari ini, kita tahu mereka tidak dapat disingkirkan dengan mudah. Mereka adalah bagian utuh dari relativitas umum. Dan bahkan, mereka mungkin dapat menyelamatkan setiap makhluk berakal yang menghadapi *big freeze*.

Tapi barangkali hal teraneh dari anomali-anomali ini adalah kemungkinan adanya alam-alam semesta paralel dan gerbang yang menghubungkan mereka. Kalau kita ingat metafora yang Shakespeare perkenalkan bahwa dunia hanyalah panggung, maka relativitas umum mengakui kemungkinan adanya pintu kolong. Tapi bukannya menuju besmen, kita dapati pintu kolong tersebut mengarah ke panggung-panggung paralel seperti yang asli. Bayangkan panggung kehidupan yang terdiri dari panggung-panggung multikisah, satu di atas yang lain. Di tiap panggung, para aktor membaca dialog dan berkeliling di tempat, mengira panggung mereka adalah satu-satunya panggung, tak sadar akan kemungkinan adanya realitas-realitas lain. Namun, jika suatu hari mereka tak sengaja jatuh terperosok ke sebuah pintu kolong, mereka mendapati diri mereka masuk ke dalam panggung yang sama sekali baru, dengan hukum yang baru, aturan yang baru, dan naskah yang baru.

Tapi jika alam semesta dalam jumlah tak terhingga bisa eksis, maka apakah kehidupan memungkinkan di alam-alam semesta ini dengan hukum fisika berbeda? Pertanyaan inilah yang dikemukakan oleh Isaac Asimov dalam kisah sains fiksi klasiknya, *The Gods Themselves*, di mana dia menciptakan sebuah alam semesta paralel dengan gaya nuklir yang berbeda dari milik kita. Kemungkinan-kemungkinan baru dan mengherankan timbul ketika hukum fisika biasa dicabut, kemudian diperkenalkan hukum baru.

Kisah tersebut bermula pada tahun 2070, saat seorang ilmuwan, Frederick Hallam, memperhatikan tungsten-186 standar terkonversi secara aneh menjadi plutonium-186 misterius, yang mempunyai terlalu banyak proton dan semestinya tidak stabil. Hallam berteori, plutonium-186 aneh ini berasal dari alam semesta paralel di mana gaya nuklirnya jauh lebih kuat, sehingga mengatasi tolakan proton. Karena plutonium-186 aneh ini melepaskan energi dalam jumlah besar berbentuk elektron, ia dapat dimanfaatkan untuk mencurahkan *free energy* secara melimpah. Ini memungkinkan terwujudnya pompa elektron kenamaan Hallam, yang memecahkan krisis energi Bumi, menjadikannya seorang pria kaya-raya. Tapi ada harga yang harus dibayar. Jika cukup banyak plutonium-186 aneh memasuki alam semesta kita, maka intensitas gaya nuklir secara umum akan meningkat. Berarti semakin banyak energi akan dilepaskan dari proses fusi, dan Matahari akan menerang dan akhirnya meledak, memusnahkan seluruh tata surya!

Sementara itu, alien di alam semesta paralel punya perspektif

berbeda. Alam semesta mereka sekarat. Gaya nuklir di alam semesta mereka sungguh kuat, artinya bintang-bintang mengkonsumsi hidrogen sangat cepat dan akan segera mati. Mereka mengadakan pertukaran di mana pultioium-186 yang tak berguna dikirim ke alam semesta kita demi mendapat tungsten-186 yang berharga, yang memungkinkan mereka menciptakan pompa positron, yang menyelamatkan dunia sekarat mereka. Meski sadar kekuatan gaya nuklir di alam semesta kita akan meningkat, akibatnya bintang-bintang kita meledak, mereka tak peduli.

Tampaknya Bumi sedang menuju malapetaka. Manusia kecanduan *free energy*-nya Hallam, menolak percaya bahwa Matahari akan segera meledak. Seorang ilmuwan lain menghasilkan solusi cerdik untuk teka-teki ini. Dia yakin ada alam semesta paralel lain. Dia berhasil memodifikasi sebuah pemecah atom hebat untuk menciptakan lubang di ruang yang menghubungkan alam semesta kita dengan banyak alam semesta lain. Menelusuri mereka, akhirnya dia temukan satu alam semesta paralel yang kosong, hanya terdapat "telur kosmik" berisi energi tak terbatas, tapi gaya nuklirnya lebih lemah.

Dengan menyedot energi dari telur kosmik ini, dia dapat menciptakan pompa energi baru dan sekaligus memperlemah gaya nuklir di alam semesta kita, alhasil mencegah Matahari meledak. Namun ada harga yang harus dibayar: gaya nuklir alam semesta paralel baru ini akan meningkat, membuatnya meledak. Tapi dia beralasan, ledakan ini justru akan menyebabkan telur kosmik "menetas", menciptakan *big bang* baru. Praktisnya, dia sadar dirinya

akan menjadi bidan bagi sebuah alam semesta mengembang yang baru.

Kisah sains fiksi karangan Asimov merupakan salah satu dari segelintir karya yang betul-betul memakai hukum fisika nuklir untuk memintal kisah ketamakan, intrik, dan penyelamatan. Asimov benar dalam berasumsi bahwa pengubahan kekuatan gaya-gaya di alam semesta kita akan menimbulkan bencana besar, bahwa bintang-bintang di alam semesta kita akan menerang dan kemudian meledak bila kekuatan gaya nuklir dinaikkan. Ini menimbulkan pertanyaan tak terelakkan: apakah alam semesta paralel konsisten dengan hukum fisika? Dan jika ya, apa yang diperlukan untuk memasukinya?

Untuk memahami pertanyaan-pertanyaan ini, terlebih dahulu kita harus paham sifat *wormhole*, energi negatif, dan, tentu saja, objek misterius bernama *black hole*.

Black Hole

Pada 1783, astronom Inggris John Michell menjadi orang pertama yang bertanya-tanya: apa yang akan terjadi jika sebuah bintang menjadi begitu besar, hingga cahaya sendiri tidak dapat melarikan diri darinya. Setiap objek, setahunya, mempunyai "kecepatan pelarian" (*escape velocity*), kecepatan yang dibutuhkan untuk meninggaikan tarikan gravitasinya. (Untuk Bumi, misalnya, kecepatan pelariannya adalah 25.000 mil/jam, kecepatan yang harus dicapai roket untuk lepas dari gravitasi Bumi.)

Michell penasaran apa yang mungkin terjadi jika sebuah bintang

menjadi begitu masif sehingga kecepatan pelariannya setara dengan kecepatan cahaya. Gravitasinya akan besar sekali, sampai-sampai tak ada yang mampu melarikan diri darinya, bahkan cahaya itu sendiri, dan karenanya objek tersebut akan tampak hitam bagi dunia luar. Sedikit-banyak, menemukan objek demikian di angkasa akan mustahil, sebab ia tidak bisa dilihat.

Persoalan "bintang gelap" Michell sebagian besar terlupakan selama satu setengah abad. Tapi perkara tersebut mengemuka lagi pada 1916 tatkala Karl Schwarzschild, seorang fisikawan Jerman yang berdinas dalam pasukan Jerman di front Rusia, menemukan solusi tepat bagi persamaan Einstein untuk bintang masif. Sampai hari ini pun, solusi Schwarzschild dikenal sebagai solusi tepat paling sederhana dan paling elegan bagi persamaan Einstein. Einstein takjub Schwarzschild sanggup menemukan sebuah solusi bagi persamaan tensor rumitnya sambil menghindari selongsong artileri. Dia juga takjub solusi Schwarzschild mempunyai sifat khas.

Solusi Schwarzschild, dari jauh, mungkin melambangkan gravitasi bintang biasa, dan Einstein cepat-cepat memakai solusi tersebut untuk mengkalkulasi gravitasi di sekeliling Matahari dan mengecek kalkulasi sebelumnya, di mana dia telah membuat taksiran. Untuk ini dia selalu berterima kasih kepada Schwarzschild. Tapi dalam makalah kedua, Schwarzschild menunjukkan di sekeliling bintang amat masif terdapat "bulatan gaib" khayali beratribut ganjil. "Bulatan gaib" ini adalah *point of no return* (titik tanpa kembali). Siapapun yang melewati "bulatan gaib" tersebut akan segera terisap oleh gravitasi ke dalam

bintang, takkan pernah terlihat lagi. Cahaya sekalipun tidak dapat lari jika jatuh ke dalam bulatan ini. Schwarzschild tidak sadar sedang menemukan ulang bintang gelap Michell, lewat persamaan Einstein.

Berikutnya dia mengkalkulasi radius bulatan gaib ini (disebut radius Schwarzschild). Untuk objek seukuran Matahari kita, bulatan gaib tersebut beradius sekitar 3 kilometer (kira-kira 2 mil). (Untuk Bumi, radius Schwarzschild-nya adalah sekitar 1 centimeter.) Artinya jika seseorang dapat memampatkan radius Matahari sampai seukuran 2 mil, maka ia akan menjadi bintang gelap dan melahap setiap objek yang melintasi titik tanpa kembali ini.

Secara eksperimen, eksistensi bulatan gaib ini tidak menimbulkan masalah, karena mustahil untuk memeras Matahari sampai seukuran 2 mil. Tak ada mekanisme untuk menciptakan bintang sefantastik itu. Tapi secara teoritis, itu malapetaka. Walaupun teori relativitas umum Einstein membuahkan hasil gemilang, contohnya penekukan cahaya bintang di sekitar Matahari, teori ini tidak masuk akal seiring Anda mendekati bulatan gaib itu sendiri, di mana gravitasi menjadi tak terhingga.

Seorang fisikawan Belanda, Johannes Droste, kemudian menunjukkan bahwa solusi tersebut lebih gila lagi. Dia mengungkap, berdasarkan relativitas, sorot cahaya akan tekuk hebat sewaktu membeloki objek. Padahal, pada 1,5 kali radius Schwarzschild, sorot cahaya sebetulnya mengorbit bintang secara melingkar. Menurut Droste, distorsi waktu sekitar bintang-bintang masif yang dijumpai dalam relativitas umum ini jauh lebih buruk daripada yang dijumpai

dalam relativitas khusus. Dia menunjukkan, saat Anda mendekati bulatan gaib, seseorang dari kejauhan akan menyebut jam Anda terus melambat, hingga berhenti total ketika Anda mengenai objek tersebut. Seseorang dari luar akan bilang Anda terbeku dalam waktu selagi mencapai bulatan gaib. Karena waktu sendiri akan berhenti di titik ini, sebagian ilmuwan yakin objek seganjil itu tak mungkin eksis di alam. Yang membuat persoalan kian menarik, matematikawan Herman Weyl berpendapat bahwa bila kita menyelidiki dunia di dalam bulatan gaib itu, tampak ada alam semesta lain di sisi lain.

Saking fantastiknya semua ini, Einstein pun tidak percaya. Pada 1922, dalam sebuah konferensi di Paris, dia ditanya oleh matematikawan Jacques Hadamard: apa yang akan terjadi seandainya "singularitas" ini nyata, yakni seandainya gravitasi menjadi tak terhingga pada radius Schwarzschild. Einstein menjawab, "Itu akan jadi malapetaka tulen bagi teori; dan akan sangat sulit untuk mengatakan secara *a priori* apa yang mungkin terjadi secara fisikal, sebab rumusnya tidak berlaku lagi." Di kemudian hari Einstein menyebutnya sebagai "petaka Hadamard". Tapi dia berpikir, semua kontroversi seputar bintang gelap ini spekulasi belaka. Pertama, tidak ada yang pernah melihat objek seganjil itu, dan barangkali mereka tidak eksis, dengan kata lain mereka tidak fisikal. Selain itu, Anda akan tergumal sampai mati jika jatuh ke dalamnya. Dan karena tidak ada yang pernah melewati bulatan gaib tersebut (karena waktu telah berhenti), maka tak ada yang pernah bisa memasuki alam semesta paralel ini.

Pada 1920-an, fisikawan kebingungan bukan kepalang terkait isu ini. Tapi pada 1932 sebuah terobosan penting dibuat oleh Georges Lemaître, bapak teori *big bang*. Dia menunjukkan bahwa bulatan gaib bukanlah singularitas di mana gravitasi menjadi tak terhingga; ia hanya ilusi matematis yang disebabkan oleh pemilihan set matematika tak mujur. (Bila seseorang memilih set koordinat atau variabel berbeda untuk menguji bulatan gaib, singularitas lenyap.)

Mengambil temuan ini, kosmolog H.P. Robertson kemudian menguji ulang temuan asli Droste bahwa waktu berhenti di bulatan gaib. Dia mendapati waktu berhenti hanya dari sudut pandang seorang pengamat yang menyaksikan sebuah kapal roket memasuki bulatan gaib. Dari sudut pandang kapal roket itu sendiri, hanya perlu sepecahan detik bagi gravitasi untuk mengisap tubuh Anda persis setelah melewati bulatan gaib. Dengan kata lain, seorang pelancong antariksa yang cukup sial menembus bulatan gaib akan mendapati dirinya tergumal sampai mati nyaris seketika, tapi menurut seorang pengamat yang menyaksikan dari luar, itu akan terlihat memakan waktu ribuan tahun.

Ini temuan penting. Artinya bulatan gaib dapat dijangkau dan tak bisa lagi diabaikan sebagai barang ganjil matematika. Kita harus serius mempertimbangkan apa yang mungkin terjadi jika menembus bulatan gaib itu. Fisikawan lantas mengkalkulasi akan seperti apa perjalanan menembus bulatan gaib. (Hari ini, bulatan gaib ini disebut horison peristiwa. Horison merujuk kepada titik terjauh yang bisa kita lihat. Di sini, ia merujuk kepada titik terjauh yang bisa ditempuh oleh cahaya.

Radius horison peristiwa disebut radius Schwarzschild.)

Sewaktu mendekati *black hole* dengan kapal roket, Anda akan melihat cahaya yang tertangkap miliaran tahun lalu oleh *black hole*, ketika *black hole* tersebut sendiri pertama kali terbentuk. Dengan kata lain, sejarah kehidupan *black hole* akan terungkap kepada Anda. Seiring kian dekat, gaya tidal akan berangsur merobek-robek atom tubuh Anda, bahkan sampai nukleus atom Anda terlihat seperti spageti. Perjalanan menembus horison peristiwa akan menjadi perjalanan searah, sebab gravitasinya begitu hebat sehingga Anda pasti terisap ke pusat, di mana Anda akan digumal sampai mati. Sekali berada di dalam horison peristiwa, tidak akan ada jalan kembali. (Untuk meninggalkan horison peristiwa, seseorang harus bergerak lebih cepat daripada cahaya, yang mana mustahil.)

Pada 1939, Einstein menulis sebuah makalah di mana dia mencoba mengabaikan bintang segelap itu, mengklaim mereka tidak bisa terbentuk lewat proses alami. Dia memulai dengan berasumsi bahwa sebuah bintang terbentuk dari kumpulan debu, gas, dan puing berpusar yang berotasi dalam bulatan, lambat-laun menyatu akibat gravitasi. Kemudian dia tunjukkan bahwa kumpulan partikel berpusar ini takkan pernah kolaps ke bawah radius Schwarzschild-nya, dan karenanya takkan pernah menjadi *black hole*. Paling banter, massa partikel berpusar ini akan mendekati 1,5 kali radius Schwarzschild, dan karenanya *black hole* takkan pernah terbentuk. (Untuk pergi ke bawah 1,5 kali radius Schwarzschild, seseorang harus bergerak lebih cepat daripada kecepatan cahaya, yang mana mustahil.) “Hasil krusial

dari investigasi ini adalah pemahaman jernih tentang mengapa 'singularitas Schwarzschild' tidak eksis di realitas fisik," tulis Einstein.

Arthur Eddington juga punya keberatan mendalam terhadap *black hole* dan menyimpan kecurigaan panjang bahwa mereka tidak pernah mungkin eksis. Suatu kali dia berkata, pasti "ada hukum Alam yang mencegah sebuah bintang berperilaku secara absurd begini".

Ironisnya, di tahun yang sama, J. Robert Oppenheimer (yang kelak menciptakan bom atom) dan mahasiswanya, Hartland Snyder, menunjukkan bahwa *black hole* memang *bisa* terbentuk, lewat mekanisme lain. Alih-alih mengasumsikan *black hole* muncul dari kumpulan partikel berpusar yang kolaps akibat gravitasi, sebagai titik tolak mereka memakai bintang masif tua yang telah kehabisan bahan bakar nuklir dan termampatkan oleh gravitasi ke bawah radius Schwarzschild 80 mil-nya, di mana ia tak ayal lagi akan kolaps menjadi *black hole*. *Black hole,* kata mereka, bukan hanya mungkin, tapi juga menjadi titik akhir alami bagi miliaran bintang raksasa sekarat di galaksi. (Barangkali ide implosi, yang dipelopori oleh Oppenheimer pada 1939, memberinya inspirasi untuk mekanisme implosi yang dipakai pada bom atom beberapa tahun kemudian.)

Jembatan Einstein-Rosen

Meski menurut Einstein *black hole* terlalu luar biasa untuk eksis di alam, ironisnya dia kemudian menunjukkan bahwa mereka lebih aneh lagi dari yang diperkirakan setiap orang, memperkenankan kemungkinan adanya *wormhole* di jantung *black hole*. Matematikawan

menjulukinya *multiply connected space*. Fisikawan menjulukinya *wormhole* karena, seperti seekor cacing yang menggali ke dalam tanah, mereka menciptakan jalan pintas alternatif di antara dua titik. Terkadang mereka disebut portal atau gerbang dimensi. Apapun sebutannya, suatu hari nanti mereka mungkin menyediakan sarana terakhir untuk perjalanan antardimensi.

Orang pertama yang mempopulerkan *wormhole* adalah Charles Dodgson, yang menulis dengan nama pena Lewis Carroll. Dalam *Through the Looking Glass*, dia memperkenalkan *wormhole* sebagai cermin, yang menghubungkan pedesaan Oxford dengan Wonderland. Sebagai seorang matematikawan profesional dan don Oxford, Dodgson akrab dengan *multiply connected space* ini. Secara definisi, *multiply connected space* adalah ruang di mana laso tidak bisa disusutkan menjadi titik. Biasanya, simpal apapun dapat dengan mudah diperpendek menjadi titik. Tapi jika kita analisa sebuah donat, maka mungkin saja kita menempatkan laso pada permukaannya hingga melingkari lubang donat. Sambil memperpendek simpal sedikit demi sedikit, kita dapati ia tidak bisa dimampatkan menjadi titik; paling banter, ia bisa disusutkan jadi seukuran keliling lubang donat.

Para matematikawan gembira akan fakta bahwa mereka telah menemukan sebuah objek yang sama sekali tak berguna dalam menggambarkan ruang. Tapi pada 1935, Einstein dan mahasiswanya, Nathan Rosen, memperkenalkan *wormhole* kepada dunia fisika. Mereka coba memakai solusi *black hole* tersebut sebagai model untuk partikel unsur. Einstein tak pernah menyukai ide, sejak zaman

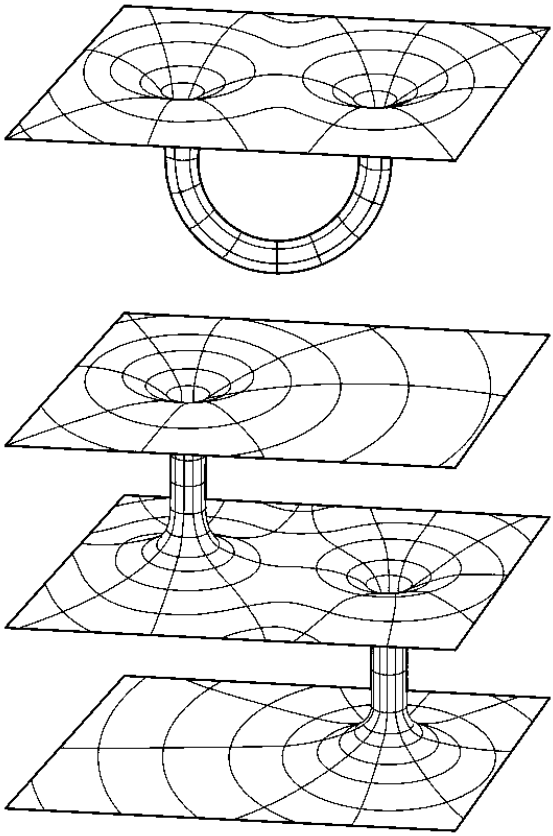
Newton, bahwa gravitasi sebuah partikel menjadi tak terhingga seiring Anda mendekatinya. "Singularitas" ini, pikir Einstein, mesti disingkirkan, sebab tidak masuk akal.

Einstein dan Rosen mempunyai ide baru penggambaran elektron (yang biasanya dianggap sebagai titik amat kecil tanpa struktur) sebagai *black hole*. Dengan cara ini, relativitas umum bisa dipakai untuk menjelaskan misteri-misteri dunia quantum dalam sebuah teori medan terpadu. Mereka memulai dengan solusi standar *black hole*, yang menyerupai vas besar berleher panjang. Mereka lantas memotong lehernya, dan menggabungnya dengan solusi *black hole* lain yang terbalik. Bagi Einstein, konfigurasi aneh tapi halus ini akan bebas dari singularitas di pangkal *black hole* dan dapat beraksi seperti elektron.

Sayangnya ide Einstein untuk menggambarkan elektron sebagai *black hole* gagal. Tapi hari ini kosmolog berspekulasi bahwa jembatan Einstein-Rosen dapat bertindak sebagai gerbang antara dua alam semesta. Kita dapat bergerak bebas di satu alam semesta sampai tak sengaja jatuh ke dalam *black hole*, di mana kita akan mendadak terisap lewat lubang untuk muncul di sisi lain (melintasi *white hole*).

Bagi Einstein, setiap solusi atas persamaannya, jika dimulai dengan titik tolak yang masuk akal secara fisikal, semestinya ekuivalen dengan objek yang mungkin secara fisikal. Tapi dia tidak cemas soal seseorang yang jatuh ke dalam *black hole* dan memasuki alam semesta paralel. Gaya-gaya tidal akan menjadi tak terhingga di pusatnya, dan setiap orang yang cukup sial untuk jatuh ke dalam *black hole* akan

mendapati atom-atom tubuh mereka dirobek-robek oleh medan gravitasi. (Jembatan Einstein-Rosen terbuka sebentar, tapi ia menutup begitu cepat sehingga tidak ada objek yang dapat melewatinya tepat waktu untuk menggapai sisi lain.) Sikap Einstein adalah: meski *wormhole* mungkin eksis, makhluk hidup takkan pernah bisa melewatinya dan bertahan hidup untuk menceritakannya.



Gambar 8: Jembatan Einstein-Rosen. Di pusat sebuah *black hole*, terdapat "kerongkongan/leher" yang menghubungkan ruang-waktu ke alam semesta lain atau titik lain di alam semesta kita. Walaupun perjalanan menembus *black hole* diam akan sangat fatal, *black hole*

berotasi memiliki singularitas mirip cincin, sehingga memungkinkan untuk melewati cincin dan melintasi jembatan Einstein-Rosen, kendati ini masih spekulatif.

Black Hole yang Berotasi

Namun pada 1963 pandangan ini mulai berubah, tatkala matematikawan Selandia Baru, Roy Kerr, menemukan solusi tepat persamaan Einstein yang menggambarkan bintang sekarat yang barangkali paling realistis, *black hole* berputar. Berkat kekekalan momentum sudut, seiring kolapsnya bintang akibat gravitasi, ia berputar semakin cepat. (Untuk alasan ini pula mengapa galaksi yang berputar terlihat seperti *pinwheel*, dan mengapa para skater berputar lebih cepat ketika mereka memasukkan lengan.) Bintang berputar dapat kolaps menjadi cincin neutron, yang akan tetap stabil berkat gaya sentrifugal kuat yang mendorong keluar, menetralisir gaya gravitasi masuk. Fitur menakjubkan dari *black hole* demikian adalah bahwa jika Anda jatuh ke dalam *black hole* Kerr ini, Anda tidak akan tergumal sampai mati. Sebaliknya, Anda akan terisap total lewat jembatan Einstein-Rosen menuju alam semesta paralel. "Lintasi cincin gaib ini dan—*presto*!—Anda berada di alam semesta berbeda sama sekali di mana radius dan massa adalah negatif!" seru Kerr kepada seorang kolega saat menemukan solusi ini.

Bingkai cermin Alice, dengan kata lain, menyerupai cincin berputar Kerr. Tapi perjalanan menembus cincin Kerr akan jadi perjalanan satu arah. Jika Anda melewati horison peristiwa di sekeliling cincin Kerr,

gravitasi tidak akan cukup untuk menggumal Anda sampai mati, tapi akan cukup untuk mencegah perjalanan pulang lewat horison peristiwa tersebut. (*Black hole* Kerr, sebetulnya, memiliki dua horison peristiwa. Sebagian orang berspekulasi, Anda butuh cincin Kerr kedua, yang menyambung balik alam semesta paralel dengan alam semesta kita, untuk mengadakan perjalanan pulang.) Dalam beberapa hal, *black hole* Kerr dapat disamakan dengan elevator di gedung pencakar langit. Elevator melambangkan jembatan Einstein-Rosen, yang menghubungkan lantai-lantai berlainan, di mana tiap lantai adalah alam semesta berbeda. Kenyataannya, terdapat lantai dalam jumlah tak terhingga di gedung ini, masing-masing berbeda dari satu sama lain. Tapi elevator tersebut tak pernah bisa turun. Hanya ada tombol "naik". Sekali Anda meninggalkan suatu lantai, atau alam semesta, takkan ada perjalanan pulang, sebab Anda telah melewati horison peristiwa.

Fisikawan terpecah mengenai seberapa stabil cincin Kerr ini. Beberapa kalkulasi mengisyaratkan, bila seseorang berusaha melintasi cincin, keberadaaan orang tersebut akan mendestabilisasi *black hole*, dan gerbang akan tertutup. Jika sorot cahaya, misalnya, masuk ke dalam *black hole* Kerr, ia akan semakin berenergi seiring jatuh ke pusatnya dan menjadi teringsutbirukan—dengan kata lain, frekuensi dan energinya meningkat. Seraya mendekati horison, ia akan punya banyak energi sampai-sampai dapat membunuh siapapun yang mencoba melewati jembatan Einstein-Rosen. Ia juga akan menghasilkan medan gravitasinya sendiri, yang akan berinterferensi dengan

black hole asli, mungkin menghancurkan gerbang.

Dengan kata lain, meski beberapa fisikawan percaya bahwa *black hole* Kerr adalah yang paling realistis di antara semua *black hole*, dan sungguh-sungguh dapat menghubungkan alam-alam semesta paralel, tidak jelas seberapa aman memasuki jembatannya atau seberapa stabil gerbangnya.

Mengobservasi Black Hole

Lantaran atribut ganjil *black hole*, setidaknya di awal 1990-an eksistensi mereka masih dianggap sains fiksi. "10 tahun lalu, bila Anda menemukan sebuah objek yang Anda pikir adalah *black hole* di pusat galaksi, sebagian orang mengira Anda orang gila," kata astronom Douglas Richstone dari Universitas Michigan pada 1998. Sejak saat itu, astronom telah mengidentifikasi beberapa ratus *black hole* di angkasa luar via teleskop antariksa Hubble, teleskop sinar X antariksa Chandra (yang mengukur emisi sinar X dari sumber-sumber bintang dan galaksi yang kuat), dan Very Large Array Radio Telescope (yang terdiri dari serangkaian teleskop radio canggih di New Mexico). Kenyataannya, banyak astronom percaya bahwa sebagian besar galaksi di angkasa (yang mempunyai tonjolan tengah di pusat cakramnya) mempunyai *black hole* di pusatnya.

Sebagaimana diprediksikan, semua *black hole* yang ditemukan di angkasa berotasi sangat cepat; beberapa telah tercatat oleh teleskop antariksa Hubble berotasi sekitar satu juta mil per jam. Di pusatnya, seseorang bisa melihat inti flat sirkuler yang kebanyakan berdiameter

satu tahun-cahaya. Di dalam inti tersebut terdapat horison peristiwa dan *black hole* sendiri.

Karena *black hole* tak dapat dilihat, astronom harus menggunakan cara tak langsung untuk memverifikasi keberadaan mereka. Pada foto-foto, astronom mencoba mengidentifikasi "cakram akresi" gas beterbangan yang mengelilingi *black hole*. Astronom kini telah mengumpulkan foto-foto menawan cakram akresi ini. (Cakram-cakram ini hampir secara universal ditemukan pada sebagian besar objek yang berputar cepat di alam semesta. Matahari kita pun barangkali memiliki cakram serupa di sekelilingnya ketika terbentuk 4-5 miliar tahun silam, yang kemudian berkondensasi menjadi planet-planet. Alasan mengapa cakram-cakram ini terbentuk adalah bahwa mereka merepresentasikan kondisi energi terendah untuk objek yang berputar secepat itu.) Dengan menggunakan hukum gerak Newton, astronom dapat mengkalkulasi massa objek tengah dengan mengetahui kecepatan bintang-bintang yang mengorbit di sekeliling-nya. Bila massa objek tengah mempunyai kecepatan pelarian yang setara dengan kecepatan cahaya, maka cahaya sendiri pun tidak dapat melarikan diri, menyediakan bukti tak langsung akan keberadaan sebuah *black hole*.

Horison peristiwa terletak di pusat cakram akresi. (Sayangnya ia terlalu kecil untuk diidentifikasi dengan teknologi saat ini. Astronom Fulvio Melia mengklaim bahwa perekaman horison peristiwa sebuah *black hole* pada film adalah "*holy grail*"-nya sains *black hole*.) Tidak semua gas yang jatuh ke arah *black hole* melewati horison peristiwa.

Beberapa gas melangkaui/menghindari horison peristiwa dan terlempar memapasinya pada kecepatan tinggi dan tersembur ke angkasa, membentuk dua jet gas panjang yang keluar dari kutub utara dan selatan *black hole*. Ini memberi *black hole* tampilan gasing yang berputar. (Alasan mengapa jet tersembur seperti ini adalah mungkin karena garis-garis medan magnet bintang yang kolaps, selagi semakin kuat, menjadi terkonsentrasi di atas kutub utara dan selatan. Sewaktu bintang terus kolaps, garis-garis medan magnet ini berkondensasi menjadi dua pipa yang keluar dari kutub utara dan selatan. Saat partikel-partikel yang terionisasi jatuh ke dalam bintang kolaps tersebut, mereka mengikuti garis-garis gaya magnet sempit ini dan tersembur sebagai jet via medan magnet kutub utara dan selatan.)

Dua tipe *black hole* telah diidentifikasi. Yang pertama adalah *black hole* bintang, di mana gravitasi menggumalkan sebuah bintang sekarat hingga meledak. Yang kedua, bagaimanapun, lebih mudah dideteksi. Yaitu *black hole* galaktik, yang bersembunyi di pusat galaksi besar dan quasar dan berbobot jutaan sampai miliaran massa surya.

Belakangan, sebuah *black hole* teridentifikasi secara meyakinkan di pusat galaksi Bima Sakti kita. Sayangnya, awan-awan debu mengaburkan pusat galaksi tersebut; jika bukan karena ini, sebuah bola api besar yang datang dari arah rasi Sagitarius akan terlihat oleh kita di Bumi setiap malam. Tanpa debu, pusat galaksi Bima Sakti kita barangkali akan lebih terang daripada Bulan, menjadikannya sebagai objek paling terang di langit malam. Di pusat nukleus galaksi ini terdapat sebuah *black hole* berbobot sekitar 2,5 juta massa surya.

Perihal ukurannya, sekitar sepersepuluh radius orbit Merkurius. Menurut standar galaksi, ini bukan *black hole* yang luar biasa masif; quasar dapat memiliki *black hole* yang berbobot beberapa miliar massa surya. *Black hole* di halaman belakang kita cukup tidak bergerak saat ini.

Black hole galaktik terdekat berikutnya terdapat di pusat galaksi Andromeda, galaksi yang paling dekat dengan Bumi. Ia berbobot 30 juta massa surya, dan radius Schwarzschild-nya adalah sekitar 60 juta mil. (Di pusat galaksi Andromeda terdapat sekurangnya dua objek masif, barangkali merupakan sisa galaksi terdahulu yang diganyang oleh Andromeda miliaran tahun lalu. Jika galaksi Bima Sakti pada akhirnya bertubrukan dengan Andromeda miliaran tahun dari sekarang, sebagaimana kemungkinan besarnya, barangkali galaksi kita akan berakhir dalam "perut" galaksi Andromeda.)

Salah satu foto paling menawan dari *black hole* galaksi adalah yang diambil oleh teleskop antariksa Hubble atas galaksi NGC 4261. Di masa lalu, gambar-gambar teleskop radio dari galaksi ini memperlihatkan dua jet sangat anggun yang tertembak keluar dari kutub utara dan selatan galaksi tersebut, tapi tak ada yang tahu apa mesin di baliknya. Teleskop Hubble memotret pusat galaksi tersebut, menyingkap sebuah cakram menawan berdiameter sekitar 400 tahun-cahaya. Di pusatnya terdapat noktah kecil yang mengandung cakram akresi, berdiameter sekitar satu tahun-cahaya. *Black hole* di pusat ini, yang tidak dapat dilihat oleh teleskop Hubble, berbobot kira-kira 1,2 miliar massa surya.

Black hole-black hole galaktik seperti ini begitu kuat sehingga

mereka dapat memakan seluruh bintang. Pada 2004, NASA dan European Space Agency mengumumkan bahwa mereka telah mendeteksi sebuah *black hole* besar di sebuah galaksi jauh melahap sebuah bintang dalam satu kali telan. Teleskop sinar X Chandra dan satelit XMM-Newton Eropa mengamati peristiwa yang sama: ledakan sinar X yang dipancarkan oleh galaksi RX J 1242–11, mengisyaratkan bahwa sebuah bintang telah ditelan dengan cepat oleh *black hole* besar di pusat. *Black hole* ini diperkirakan berbobot 100 juta kali massa Matahari kita. Kalkulasi menunjukkan bahwa, sewaktu sebuah bintang secara berbahaya mendekati horison peristiwa *black hole*, gravitasi sangat besar mendistorsi dan meregangkan bintang tersebut sampai putus berantakan, memancarkan ledakan sinar X pemberi petunjuk. "Bintang ini teregangkan melampaui titik putusnya. Bintang tak beruntung ini hanya mengeluyur ke lingkungan yang salah," tinjau astronom Stefanie Komossa dari Max Planck Institute di Garching, Jerman.

Eksistensi *black hole* telah membantu memecahkan banyak misteri tua. Galaksi M-87, misalnya, dahulu selalu menimbulkan keingin-tahuan astronom karena terlihat seperti bola bintang masif dengan "ekor" aneh yang muncul darinya. Karena ia memancarkan radiasi dalam jumlah banyak sekali, pada satu titik para astronom pernah berpikir bahwa ekor ini merepresentasikan arus antimateri. Tapi hari ini, astronom telah menemukan bahwa ia ditenagai oleh *black hole* besar yang berbobot barangkali 3 miliar massa surya. Dan ekor aneh itu kini dipercaya merupakan jet plasma raksasa yang mengalir keluar

galaksi, bukan ke dalam.

Salah satu penemuan paling spektakuler menyangkut *black hole* terjadi ketika teleskop sinar X Chandra sanggup mengintai celah kecil pada debu di angkasa luar untuk mengobservasi sekumpulan *black hole* dekat tepi alam semesta tampak. Secara keseluruhan, 600 *black hole* dapat dilihat. Memperhitungkan kemungkinan dari hal itu, astronom mengestimasikan bahwa terdapat sekurangnya 300 juta *black hole* di seluruh langit malam.

Penyembur Sinar Gamma

Black hole-black hole yang disebutkan di atas barangkali berumur miliaran tahun. Tapi astronom kini mempunyai kesempatan langka untuk melihat *black hole* yang terbentuk persis di depan mata kita. Beberapa darinya mungkin merupakan penyembur sinar gamma (*gamma ray burster*) misterius yang melepaskan jumlah energi terbesar di alam semesta. Penyembur sinar gamma besar adalah yang kedua setelah *big bang* dalam hal energi yang mereka lepaskan.

Penyembur sinar gamma mempunyai sejarah yang aneh, berawal pada masa Perang Dingin. Pada akhir 1960-an, AS khawatir Uni Soviet atau negara lain secara diam-diam meledakkan bom nuklir, mungkin di bagian sunyi Bumi atau bahkan di Bulan, melanggar pakta yang ada. Jadi AS meluncurkan satelit Vela untuk secara spesifik mengamati "kilasan nuklir", atau peledakan bom nuklir yang tak sah. Karena peledakan nuklir menghampar pada tahap-tahap berbeda, mikrodetik demi mikrodetik, tiap kilasan nuklir melepaskan kilasan cahaya ganda

khas yang bisa dilihat oleh satelit. (Satelit Vela memang menangkap dua kilasan nuklir semacam itu pada 1970-an di lepas pantai Pulau Prince Edward dekat Afrika Selatan, di hadapan kapal perang Israel, penampakan yang masih diperdebatkan oleh komunitas intelijen.)

Tapi yang mengejutkan Pentagon adalah bahwa satelit Vela menangkap tanda-tanda ledakan nuklir besar di angkasa. Apakah Uni Soviet diam-diam meledakkan bom hidrogen di angkasa, menggunakan teknologi maju yang tak diketahui? Risau bahwa Soviet kemungkinan telah melampaui AS dalam teknologi persenjataan, ilmuwan-ilmuwan top diikutsertakan untuk menganalisa sinyal yang amat menggelisahkan ini.

Setelah bubarnya Uni Soviet, tak ada keharusan untuk merahasiakan informasi ini, jadi Pentagon mengeluarkan setumpukan data astronomi ke dunia astronomi, yang sangat berlimpah. Untuk pertama kalinya dalam berdekade-dekade, sebuah fenomena astronomis yang sama sekali baru berupa tenaga dan jangkauan besar terungkap. Astronom segera menyadari bahwa penyembur sinar gamma ini, demikian mereka disebut, bertenaga raksasa, dalam hitungan detik melepaskan seluruh output energi Matahari kita di sepanjang sejarah hidupnya (sekitar 10 miliar tahun). Tapi peristiwa ini juga berlangsung singkat; sekali terdeteksi oleh satelit Vela, mereka meredup sangat banyak sehingga pada waktu teleskop Bumi ditujukan ke arah mereka, tak ada yang bisa dilihat seusainya. (Kebanyakan penyembur berlangsung antara 1 sampai 10 detik, tapi yang tersingkat berlangsung selama 0,01 detik, dan beberapa berlangsung selama beberapa menit.)

Hari ini, teleskop antariksa, komputer, dan tim tanggap cepat telah mengubah kemampuan kita untuk menangkap penyembur sinar gamma. Sekitar 3 kali sehari, penyembur sinar gamma terdeteksi, meledakkan rantai peristiwa kompleks. Segera setelah energi darinya terdeteksi oleh satelit, astronom, dengan menggunakan komputer, secara cepat menemukan koodinat tepatnya dan lalu membidikkan teleskop dan sensor lain ke arah tepatnya.

Data dari instrumen-instrumen ini telah mengungkap hasil yang betul-betul mengherankan. Di jantung penyembur-penyembur sinar gamma ini terdapat sebuah objek yang kebanyakan hanya berdiameter beberapa puluh mil. Dengan kata lain, tenaga kosmik luar biasa dari penyembur sinar kosmik ini terkonsentrasi di area seukuran, katakanlah, New York City. Selama bertahun-tahun, kandidat utama untuk peristiwa semacam itu adalah tubrukan bintang-bintang neutron di sistem bintang biner. Menurut teori ini, selagi orbit bintang-bintang neutron ini meluruh seiring waktu, dan selagi mereka mengikuti spiral maut, pada akhirnya mereka akan bertubrukan dan menghasilkan pelepasan energi raksasa. Peristiwa semacam itu amat jarang, tapi karena alam semesta begitu luas, dan karena penyembur-penyembur ini menerangi seluruh alam semesta, semestinya mereka terlihat beberapa kali sehari.

Tapi pada 2003, bukti baru yang dikumpulkan ilmuwan mengindikasikan bahwa penyembur sinar gamma adalah hasil "hipernova" yang menciptakan *black hole* masif. Dengan secara cepat memfokuskan teleskop dan satelit ke arah penyembur-penyembur

sinar gamma, ilmuwan menemukan bahwa penyembur itu menyerupai supernova masif. Karena bintang yang meledak mempunyai medan magnet besar dan menyemburkan radiasi lewat arah kutub utara dan selatannya, supernova terlihat seolah-olah lebih energetik dari yang sesungguhnya—dengan kata lain, kita hanya melihat penyembur-penyembur ini jika mereka mengarah tepat ke Bumi, memberikan kesan palsu bahwa mereka lebih bertenaga dari yang sesungguhnya.

Jika memang penyembur sinar gamma adalah *black hole* yang sedang dalam pembentukan, maka generasi teleskop antariksa berikutnya semestinya mampu menganalisa mereka secara sangat detil dan barangkali menjawab beberapa pertanyaan terdalam kita tentang ruang dan waktu. Rincinya, jika *black hole* dapat menekuk ruang menjadi kue kering, bisa mereka menekuk waktu pula?

Mesin Waktu Van Stockum

Teori Einstein menjalin ruang dan waktu menjadi kesatuan tak terpisah. Alhasil, *wormhole* yang menghubungkan dua titik ruang yang jauh kemungkinan pula menghubungkan dua titik waktu yang jauh. Dengan kata lain, teori Einstein memperkenankan kemungkinan perjalanan waktu.

Konsep waktu sendiri telah berkembang selama berabad-abad. Bagi Newton, waktu adalah seperti anak panah; sekali dilepaskan, ia tak pernah berubah arah, dan berjalan secara tepat dan seragam menuju targetnya. Einstein kemudian memperkenaikan konsep ruang

melengkung, sehingga waktu adalah lebih seperti sungai yang secara lemah lembut mencepat atau melambat selagi berkelok-kelok di alam semesta. Tapi Einstein cemas tentang kemungkinan bahwa sungai waktu bisa menekuk balik dirinya sendiri. Boleh jadi terdapat pusaran air atau anak sungai di sungai waktu.

Pada 1937, kemungkinan ini disadari ketika W. J. Van Stockum menemukan sebuah solusi untuk persamaan Einstein yang memperkenankan perjalanan waktu. Dia memulai dengan silinder maha besar yang berputar. Walaupun tidak mungkin secara fisikal untuk membangun sebuah objek maha luas, dia berkalkulasi bahwa jika silinder semacam itu berputar pada atau mendekati kecepatan cahaya, ia akan menyeret struktur ruang-waktu bersamanya, mirip seperti sirup gula yang terseret bersama dengan pisau blender. (Ini disebut *frame-dragging*, dan menurut eksperimen kini telah terlihat pada foto-foto detil *black hole* yang berotasi.)

Seseorang yang cukup berani untuk berjalan mengelilingi silinder akan ikut tersapu, mencapai kecepatan fantastik. Kenyataannya, menurut pengamat jauh, orang tersebut akan terlihat melampaui kecepatan cahaya. Walaupun Van Stockum sendiri pada saat itu tidak menyadarinya, dengan melakukan perjalanan sempurna mengelilingi silinder, Anda sebetulnya dapat pergi mundur ke masa lalu, pulang sebelum berangkat. Bila Anda berangkat pada tengah hari, maka pada waktu Anda pulang ke titik tolak Anda, kemungkinannya adalah pukul 6 sore di hari kemarin. Semakin cepat silinder berputar, semakin jauh Anda kembali ke masa lalu (satu-satunya batasan adalah bahwa Anda

tidak bisa pergi mundur melebihi waktu pembuatan silinder itu sendiri).

Karena silinder adalah seperti *maypole*[5], setiap kali Anda berdansa mengelilingi galah, Anda akan memutar semakin jauh mundur ke masa lalu. Tentu saja, seseorang dapat menolak solusi seperti itu karena silinder tidak mungkin panjang tak terhingga. Di samping itu, bila silinder semacam itu bisa dibangun, gaya sentrifugal terhadap silinder, karena ia berputar mendekati kecepatan cahaya, akan sangat besar, menyebabkan material penyusun silinder terbang berserakan.

Alam Semesta Gödel

Pada 1949, Kurt Gödel, ahli logika matematis besar, menemukan solusi yang lebih aneh lagi untuk persamaan Einstein. Dia berasumsi bahwa alam semesta secara keseluruhan sedang berotasi. Seperti silinder Van Stockum, seseorang akan tersapu oleh sifat ruang-waktu yang mirip sirup gula. Dengan membawa kapal roket mengelilingi alam semesta Gödel, Anda dapat pulang ke titik tolak Anda tapi bergeser mundur dalam waktu.

Di alam semesta Gödel, seseorang bisa, pada prinsipnya, berjalan di antara dua titik ruang dan waktu di alam semesta. Setiap peristiwa, di setiap periode waktu, bisa dikunjungi, tak peduli seberapa jauh menuju masa lalu. Lantaran adanya gravitasi, alam semesta Gödel cenderung kolaps pada dirinya sendiri. Karenanya, gaya sentrifugal rotasi harus menyeimbangkan gaya gravitasi ini. Dengan kata lain,

[5] Galah hias untuk babak dansa dalam May Day—penj.

alam semesta harus berputar di atas kecepatan tertentu. Semakin besar alam semestanya, semakin besar kecenderungan untuk kolaps, dan semakin cepat alam semesta tersebut harus berputar guna mencegah kekolapsan.

Untuk alam semesta seukuran punya kita, misalnya, Gödel mengkalkulasi bahwa ia harus berotasi sekali setiap 70 miliar tahun, dan radius minimum untuk perjalanan waktu adalah 16 miliar tahun-cahaya. Namun untuk pergi ke masa lalu, Anda harus bergerak sedikit di bawah kecepatan cahaya.

Gödel sadar betul akan paradoks yang dapat muncul dari solusinya —kemungkinan menemui diri Anda sendiri di masa lalu dan mengubah arah sejarah. "Dengan melakukan perjalanan bulat menaiki kapal roket pada arah yang cukup lebar, adalah mungkin di dunia ini untuk memasuki wilayah masa lalu, masa kini, dan masa depan, dan kembali lagi, persis sebagaimana mungkinnya di dunia lain untuk pergi ke bagian-bagian ruang yang jauh," tulisnya. "Keadaan ini terasa menunjukkan keabsurdan. Sebab memungkinkan seseorang untuk pergi ke tempat-tempat di masa lalu yang dekat di mana dia sendiri tinggal. Di sana dia akan menemukan seseorang yang merupakan dirinya sendiri di suatu periode kehidupan sebelumnya. Nah, dia dapat melakukan sesuatu pada orang ini yang, berdasarkan ingatannya, sepengetahuannya tidak pernah terjadi padanya."

Einstein sangat terganggu oleh solusi yang ditemukan teman dan tetangganya di Institute for Advanced Study di Princeton. Tanggapannya sungguh membuka pikiran:

> Esai Kurt Gödel merupakan, menurut pendapat saya, sebuah kontribusi penting bagi teori relativitas umum, khususnya bagi analisis konsep waktu. Persoalan yang tercakup di sini telah mengganggu saya sewaktu pembangunan teori relativitas umum, tanpa berhasil menjernihkannya terlebih dahulu... Pembedaan "yang terdahulu-yang terkemudian" dibuang lantaran muncul titik-titik dunia yang terletak jauh berpisahan secara kosmologis, dan [muncul] paradoks-paradoks itu, yang menyangkut arah hubungan sebab-akibat, sebagaimana juga dinyatakan Tuan Gödel... Akan sangat menarik untuk ditimbang apakah ini tidak dilarang atas alasan fisikal.

Tanggapan Einstein menarik karena dua alasan. Pertama, dia mengakui bahwa kemungkinan perjalanan waktu mengganggu dirinya ketika dia pertama kali merumuskan relativitas umum. Karena waktu dan ruang diperlakukan seperti sepotong karet yang dapat menekuk dan melengkung, Einstein cemas bahwa struktur ruang-waktu akan melengkung begitu banyak sehingga perjalanan waktu menjadi mungkin. Kedua, dia mengesampingkan solusi Gödel atas dasar "alasan fisikal"—yaitu, alam semesta tidak berputar, melainkan mengembang.

Saat Einstein meninggal, diketahui luas bahwa persamaannya memperkenankan fenomena aneh (perjalanan waktu, *wormhole*). Tapi tak ada seorang pun yang memikirkannya secara mendalam karena ilmuwan merasa bahwa itu pada dasarnya tidak dapat direalisasikan. Konsensusnya adalah bahwa solusi-solusi ini tidak mempunyai dasar

di dunia nyata; Anda akan mati jika mencoba mencapai alam semesta paralel via *black hole*; alam semesta tidak berputar; dan Anda tidak dapat membuat silinder maha besar, yang membuat perjalanan waktu menjadi pertanyaan akademis.

Mesin Waktu Thorne

Isu perjalanan waktu tertidur selama 35 tahun sampai tahun 1985, ketika astronom Carl Sagan menulis novelnya, *Contact*, dan ingin memasukkan suatu cara di mana pahlawan wanita bisa pergi ke bintang Vega. Ini membutuhkan perjalanan dua arah, sang pahlawan pergi ke Vega dan kemudian pulang ke Bumi, sesuatu yang tidak dibolehkan oleh *wormhole* tipe *black hole*. Dia meminta nasehat kepada fisikawan Kip Thorne. Thorne menggegerkan dunia fisika dengan menemukan solusi baru bagi persamaan Einstein yang memperkenankan perjalanan waktu tanpa banyak persoalan terdahulu. Pada 1988, bersama koleganya, Michael Morris dan Ulvi Yurtsever, Thorne menunjukkan bahwa membangun sebuah mesin waktu adalah memungkinkan bila seseorang dapat memperoleh bentuk materi dan energi aneh, seperti "materi eksotis negatif" dan "energi negatif". Kalangan fisikawan mulanya skeptis terhadap solusi baru ini, karena tak ada yang pernah melihat materi eksotis ini sebelumnya, dan energi negatif hanya eksis dalam jumlah amat kecil. Tapi ini melambangkan sebuah terobosan dalam pemahaman kita akan perjalanan waktu.

Keunggulan besar materi negatif dan energi negatif adalah bahwa

mereka bisa membuat *wormhole* dapat dilintangi/diseberangi, sehingga Anda bisa melakukan perjalanan dua arah melewatinya tanpa harus mengkhawatirkan horison peristiwa. Kenyataannya, kelompok Thorne menemukan bahwa perjalanan dengan mesin waktu seperti itu sungguh halus, dibandingkan dengan tekanan yang dijumpai pada penerbangan komersial.

Namun masalahnya adalah bahwa materi eksotis (atau materi negatif) sungguh aneh. Tak seperti antimateri (yang diketahui eksis dan kemungkinan besar jatuh ke tanah akibat medan gravitasi Bumi), materi negatif justru naik, jadi ia akan mengapung ke atas gravitasi Bumi lantaran mempunyai antigravitasi. Ia ditolak, bukan ditarik, oleh materi biasa, dan oleh materi negatif lain. Artinya sungguh sulit pula untuk menemukannya di alam, seandainya ia betul-betul eksis. Ketika Bumi pertama kali terbentuk 4,5 miliar tahun lalu, materi negatif di Bumi mengapung ke angkasa luar. Jadi materi negatif kemungkinan sedang mengapung di ruang angkasa, jauh dari planet-planet. (Materi negatif mungkin takkan pernah mengenai sebuah bintang atau planet yang lewat, karena ia ditolak oleh materi biasa.)

Sementara materi negatif tak pernah terlihat (dan sungguh mungkin tidak eksis), energi negatif mungkin ada secara fisik tapi amat langka. Pada 1933, Henrik Casimir memperlihatkan bahwa dua pelat logam paralel tak bermuatan bisa menciptakan energi negatif. Normalnya, seseorang mengira bahwa dua logam tersebut akan tetap tidak bergerak karena mereka tidak bermuatan. Namun, Casimir memperlihatkan bahwa terdapat gaya tarik sangat kecil di antara

kedua pelat paralel tak bermuatan ini. Pada 1948, gaya kecil ini diukur, menunjukkan bahwa energi negatif merupakan kemungkinan nyata. Efek Casimir mengeksploitasi fitur ganjil ruang vakum. Menurut teori quantum, ruang hampa dipenuhi dengan "partikel virtual" yang berdansa muncul dan menghilang dari kenihilan. Pelanggaran terhadap kekekalan energi ini dimungkinkan terjadi lantaran prinsip ketidakpastian Heisenberg, yang memperkenankan pelanggaran hukum klasik terhormat sepanjang hal itu terjadi secara singkat. Contoh, elektron dan antielektron, disebabkan oleh ketidakpastian, mempunyai kemungkinan kecil untuk terbentuk dari kenihilan dan kemudian menghancurkan satu sama lain. Karena pelat paralel itu sangat berdekatan, partikel-partikel virtual ini tidak bisa dengan mudah muncul di antara kedua pelat. Dengan demikian, karena terdapat semakin banyak partikel virtual yang mengelilingi pelat daripada yang berada di tengah-tengah keduanya, ini menciptakan gaya ke dalam (*inward force*) dari luar yang mendorong pelat paralel saling menyatu sedikit. Efek ini diukur secara akurat pada 1966 oleh Steven Lamoreaux di Los Alamos National Laboratory. Gaya tarik yang dia ukur sangat kecil (setara dengan 1/30.000 berat seekor serangga seperti semut). Semakin kecil keterpisahan pelat, semakin besar gaya tariknya.

Jadi beginilah mesin waktu Thorne mencari cara untuk beroperasi. Sebuah peradaban maju akan memulai dengan dua pelat paralel, terpisah oleh celah sangat kecil. Pelat-pelat paralel ini kemudian akan dibentuk ulang menjadi sebuah bola, sehingga bola tersebut terdiri

dari cangkang dalam dan cangkang luar. Mereka kemudian membuat dua bola serupa dan dengan suatu cara memasang *wormhole* di antara keduanya, sehingga sebuah terowongan ruang menghubungkan kedua bola. Sekarang tiap bola melingkungi satu mulut *wormhole.*

Normalnya, waktu berdetak secara sinkron untuk kedua bola. Tapi jika kita sekarang menaruh satu bola ke dalam sebuah kapal roket yang dikirim melaju mendekati kecepatan cahaya, waktu melambat untuk kapal roket tersebut, sehingga dua bola itu tidak lagi memiliki waktu yang sinkron. Jam di kapal roket berdetak lebih lambat daripada jam di Bumi. Maka jika seseorang melompat masuk ke bola di Bumi, dia dapat terhisap melewati *wormhole* yang menghubungkannya dan tiba di kapal roket, pada suatu waktu di masa lalu. (Namun, mesin waktu ini tidak dapat membawa Anda menuju masa sebelum pembuatan mesin itu sendiri.)

Persoalan Energi Negatif

Walaupun solusi Thorne sungguh sensasional ketika diumumkan, terdapat rintangan berat pada realisasinya, bahkan untuk sebuah peradaban maju. Pertama, seseorang harus memperoleh energi negatif dalam jumlah besar, padahal sungguh langka. *Wormhole* tipe ini bergantung kepada energi negatif berjumlah besar untuk membuat mulut *wormhole* tetap terbuka. Jika seseorang menciptakan energi negatif dengan efek Casimir, yang mana sungguh kecil, maka ukuran *wormhole* akan jauh lebih kecil dari sebuah atom, membuat perjalanan melewati *wormhole* tidak bisa dilakukan. Terdapat sumber-

sumber energi negatif lain di samping efek Casimir, tapi semuanya sungguh sulit untuk dimanipulasi. Misalnya, fisikawan Paul Davies dan Stephen Fulling telah menunjukkan bahwa sebuah cermin yang bergerak cepat bisa terlihat menciptakan energi negatif, yang berakumulasi di depan cermin selagi ia bergerak. Sayangnya, seseorang harus menggerakkan cermin mendekati kecepatan cahaya untuk bisa memperoleh energi negatif. Dan seperti efek Casimir, energi negatif yang tercipta sangat kecil.

Cara lain untuk mengekstrak energi negatif adalah menggunakan sinar laser bertenaga tinggi. Dalam kondisi energi laser, terdapat "kondisi terperas" di mana energi positif dan energi negatif berkoeksis. Namun, efek ini juga sungguh sulit untuk dimanipulasi. Denyut energi negatif tipikal berlangsung selama 10^{-15} detik, diikuti oleh denyut energi positif. Memisahkan kondisi energi positif dari kondisi energi negatif adalah mungkin dilakukan, walaupun teramat sulit. Saya membahas ini lebih jauh di bab 2.

Terakhir, ternyata *black hole* juga mempunyai energi negatif, di dekat horison peristiwanya. Sebagaimana ditunjukkan oleh Jacob Bekenstein dan Stephen Hawking, *black hole* tidaklah hitam sempurna sebab ia secara perlahan menguapkan energi. Ini karena prinsip ketidakpastian memungkinkan *tunneling* (penerowongan/penembusan) radiasi melewati gravitasi *black hole* yang sangat besar. Tapi karena *black hole* yang menguap kehilangan energi, horison peristiwa secara bertahap mengecil seiring waktu. Biasanya, jika materi positif (seperti bintang) terlempar ke dalam *black hole*, horison peristiwanya

meluas. Tapi jika kita melempar materi negatif ke dalam *black hole*, horison peristiwanya akan menyusut. Dengan demikian, penguapan *black hole* menciptakan energi negatif di dekat horison peristiwanya. (Beberapa orang menganjurkan penaruhan mulut *wormhole* di sebelah horison peristiwa *black hole* untuk menuai energi negatif. Namun, penuaian energi negatif seperti itu akan luar biasa sulit dan berbahaya, karena Anda harus berada sangat dekat dengan horison peristiwa.)

Hawking telah menunjukkan bahwa secara umum energi negatif dibutuhkan untuk menstabilkan semua solusi *wormhole*. Pemikirannya sungguh sederhana. Biasanya, energi positif dapat menciptakan bukaan/lubang *wormhole* yang mengkonsentrasikan materi dan energi. Dengan demikian, sinar cahaya berkonvergensi selagi memasuki mulut *wormhole*. Namun, jika sinar cahaya ini muncul dari sisi lain, maka di suatu tempat di pusat *wormhole*, sinar cahaya semestinya tidak fokus. Satu-satunya cara ini bisa terjadi adalah bila energi negatif hadir. Lagipula, energi negatif bersifat repulsif (menolak), yang dibutuhkan untuk menjaga *wormhole* dari kekolapsan akibat gravitasi. Jadi kunci pembangunan mesin waktu atau *wormhole* adalah menemukan energi negatif dalam jumlah cukup untuk membuat mulutnya tetap terbuka dan stabil. (Sejumlah fisikawan telah menunjukkan bahwa, di hadapan medan gravitasi besar, medan energi negatif agak lazim ditemukan. Jadi barangkali suatu hari nanti energi medan gravitasi bisa dipakai untuk menggerakkan mesin waktu.)

Rintangan lain yang dihadapi mesin waktu semacam itu adalah: di mana kita menemukan *wormhole*? Thorne bersandar pada fakta bahwa *wormhole* terdapat secara alami, di apa yang disebut buih ruang-waktu. Ini berawal dari pertanyaan yang diajukan oleh filsuf Yunani, Zeno, lebih dari 2.000 tahun silam: berapa jarak terpendek yang dapat ditempuh seseorang?

Zeno suatu kali membuktikan secara matematis bahwa menyeberangi sebuah sungai adalah mustahil. Dia pertama-tama mengamati bahwa jarak ke seberang sungai dapat dibagi menjadi titik-titik tak terhingga. Karena memerlukan waktu tak terhingga untuk menyeberangi titik-titik tak terhingga, akibatnya mustahil untuk menyeberangi sungai. Atau, sebenarnya, mustahil bagi apa pun untuk bergerak sama sekali. (Perlu 2.000 tahun berikutnya, dan kehadiran kalkulus, untuk memecahkan teka-teki ini. Ditunjukkan bahwa titik-titik tak terhingga dapat diseberangkan dalam waktu tak terhingga, akhirnya membuat gerakan menjadi mungkin secara matematis.)

John Wheeler dari Princeton menganalisa persamaan Einstein untuk menemukan jarak terpendek. Wheeler menemukan bahwa pada jarak luar biasa kecil, pada ordo panjang Planck (10^{-33} cm), teori Einstein memprediksikan bahwa pelengkungan ruang bisa sungguh besar. Dengan kata lain, pada panjang Planck, ruang bukan kecil sama sekali, melainkan mengalami pelengkungan yang besar—yaitu, kusut dan "berbuih". Ruang menjadi menggumpal dan berbuih gelembung-gelembung kecil yang melesat muncul dan menghilang dari kevakuman. Ruang hampa pun, pada jarak terkecil, secara konstan

bergelegak gelembung-gelembung kecil ruang-waktu, yang sebetulnya adalah *wormhole* kecil dan bayi alam semesta. Normalnya, "partikel virtual" terdiri dari pasangan-pasangan elektron dan antielektron yang muncul sebentar sebelum saling menghancurkan. Tapi pada jarak Planck, gelembung-gelembung kecil yang merepresentasikan seluruh alam semesta dan *wormhole* dapat muncul, hanya untuk lenyap kembali menuju kevakuman. Alam semesta kita sendiri mungkin bermula sebagai salah satu dari gelembung kecil yang mengapung di buih ruang-waktu ini hingga tiba-tiba berinflasi, untuk alasan yang tidak kita pahami.

Karena *wormhole* ditemukan secara alami pada buih, Thorne berasumsi bahwa sebuah peradaban maju dengan suatu cara bisa memungut *wormhole* dari buih tersebut dan kemudian memperluas dan menstabilkannya dengan energi negatif. Walaupun proses ini akan sangat sulit, ini berada dalam jangkauan hukum fisika.

Sementara mesin waktu Thorne terasa mungkin secara matematis, walaupun luar biasa sulit untuk dibangun dari sudut pandang teknis, terdapat pertanyaan mengganggu ketiga: apakah perjalanan waktu melanggar hukum fundamental fisika?

Sebuah Alam Semesta di Kamar Tidur Anda

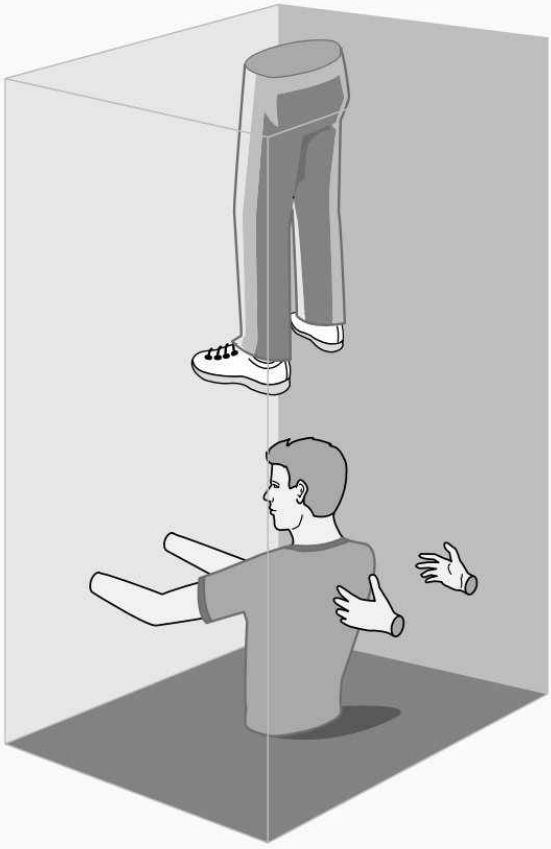
Pada 1992, Stephen Hawking mencoba memecahkan pertanyaan mengenai perjalanan waktu ini secara definitif. Menurut nalurinya, dirinya menentang perjalanan waktu; jika perjalanan menembus waktu selazim piknik hari Minggu, maka kita semestinya menyaksikan

turis-turis dari masa depan yang melongo melihat kita dan lalu mengambil gambar.

Tapi fisikawan sering mengutip dari novel epiknya T. H. White, *The Once and Future King*, di mana sebuah masyarakat semut menyatakan, "Segala sesuatu yang tidak dilarang artinya wajib." Dengan kata lain, bila tidak terdapat prinsip dasar fisika yang melarang perjalanan waktu, maka perjalanan waktu merupakan kemungkinan fisikal. (Alasan untuk ini adalah prinsip ketidakpastian. Efek dan fluktuasi quantum pada akhirnya akan memungkinkan bila kita menunggu cukup lama, kecuali kalau terdapat sesuatu yang dilarang. Dengan demikian, itu akhirnya akan terjadi, kecuali kalau ada hukum yang melarangnya.) Sebagai tanggapan, Stephen Hawking mengajukan "*chronology protection hypothesis*" (hipotesis perlindungan kronologi) yang akan mencegah perjalanan waktu dan, karenanya, "mengamankan sejarah untuk sejarawan". Menurut hipotesis ini, perjalanan waktu adalah tidak mungkin, sebab melanggar prinsip-prinsip spesifik fisika.

Karena solusi *wormhole* amat sulit dikerjakan, Hawking memulai argumennya dengan menganalisa alam semesta sederhana (*simplified universe*) yang ditemukan oleh Charles Misner dari Universitas Maryland yang mempunyai semua bahan perjalanan waktu. Ruang Misner adalah ruang ideal di mana kamar tidur Anda, contohnya, menjadi seluruh alam semesta. Katakanlah setiap titik di dinding kiri kamar tidur Anda identik dengan titik di dinding kanan. Artinya jika Anda berjalan menuju dinding kiri, hidung Anda tidak akan berdarah,

melainkan akan menembus dinding dan muncul kembali dari dinding kanan. Artinya, sedikit-banyak, dinding kiri dan kanan terhubung, seperti pada silinder.



Gambar 9: Dalam ruang Misner, seluruh alam semesta terkandung di kamar tidur Anda. Dinding-dinding yang berlawanan saling terhubung, sehingga saat memasuki dinding satu, Anda akan segera muncur dari dinding berlawanan. Atapnya, demikian pula, terhubung dengan lantai. Ruang Misner sering dipelajari karena mempunyai topologi yang sama dengan *wormhole*, namun jauh lebih sederhana untuk ditangani secara matematis. Jika dinding bergerak, maka

perjalanan waktu di alam semesta Misner menjadi mungkin.

Tambahan lagi, titik-titik di dinding depan identik dengan titik-titik di dinding belakang, dan titik-titik di atap identik dengan titik-titik di lantai. Dengan demikian, bila Anda berjalan ke arah mana pun, Anda persis menembus dinding kamar tidur Anda dan kembali lagi ke kamar tidur Anda. Anda tidak dapat melarikan diri. Dengan kata lain, kamar tidur Anda sesungguhnya adalah seluruh alam semesta!

Yang betul-betul ganjil adalah bahwa, jika Anda memandangi dinding kiri secara seksama, Anda melihat bahwa ia sebenarnya transparan dan terdapat salinan kamar tidur Anda di sisi lain dinding ini. Kenyataannya, terdapat klon/salinan persis diri Anda sedang berdiri di kamar tidur lain tersebut, walaupun Anda hanya bisa melihat sisi belakang Anda, tak pernah sisi depan Anda. Jika Anda melihat ke bawah atau ke atas, Anda juga melihat salinan diri Anda. Kenyataannya, terdapat rangkaian diri Anda dalam jumlah tak terhingga sedang berdiri di depan, di belakang, di bawah, dan di atas Anda.

Membuat kontak dengan diri Anda cukup sulit. Setiap kali Anda membalik kepala Anda untuk melihat sekilas wajah klon-klon Anda, Anda mendapati bahwa mereka juga telah berbalik, sehingga Anda tak pernah melihat wajah mereka. Tapi jika kamar tidurnya cukup kecil, Anda dapat menembuskan tangan Anda ke dinding dan meraih bahu klon di depan Anda. Kemudian Anda akan terkejut mendapati bahwa klon di belakang Anda juga telah menyentuh dan meraih bahu Anda. Di samping itu, Anda bisa menyentuh dengan tangan kiri dan kanan

Anda, memegang klon di sisi Anda, sampai ada rangkaian diri Anda dalam jumlah tak terhingga yang memegang tangan. Praktisnya, Anda telah menyentuh sekeliling alam semesta sepenuhnya untuk memegang diri Anda. (Sebaiknya tidak mencelakai klon-klon Anda. Bila Anda mengambil senapan dan mengarahkannya kepada klon di depan Anda, Anda harus mempertimbangkan kembali untuk menarik pemicunya, karena klon di belakang Anda juga sedang mengarahkan senapan kepada Anda!)

Dalam ruang Misner, asumsikan dinding-dinding kolaps di sekeliling Anda. Nah, persoalan menjadi sangat menarik. Katakanlah kamar tidurnya sedang ditekan, dengan dinding kanan yang perlahan-lahan menuju ke arah Anda pada kecepatan 2 mil per jam. Jika Anda berjalan menembus dinding kiri, Anda akan muncul kembali dari dinding kanan yang sedang bergerak, tapi didorong oleh kecepatan tambahan 2 mil per jam, jadi Anda kini berjalan dengan kecepatan 4 mil per jam. Kenyataannya, setiap kali Anda melakukan perjalanan penuh melewati dinding kiri, Anda mendapat kecepatan tambahan 2 mil per jam yang timbul dari dinding kanan, jadi Anda kini berjalan pada kecepatan 6 mil per jam. Setelah mengulangi perjalanan mengeliling alam semesta, Anda berjalan 6, 8, 10 mil per jam hingga secara bertahap mencapai kecepatan luar biasa mendekati kecepatan cahaya.

Pada titik kritis tertentu, Anda berjalan begitu cepat di alam semesta Misner ini sehingga Anda pergi ke masa lalu. Kenyataannya, Anda bisa mengunjungi titik ruang-waktu terdahulu. Hawking

menganalisa ruang Misner ini secara seksama. Dia menemukan bahwa dinding kiri dan dinding kanan, secara matematis, hampir identik dengan dua mulut *wormhole*. Dengan kata lain, kamar tidur Anda menyerupai *wormhole*, di mana dinding kiri dan dinding kanan adalah sama, serupa dengan dua mulut *wormhole*, yang juga identik.

Kemudian dia menguraikan bahwa ruang Misner ini tidak stabil, baik secara klasik maupun secara mekanika quantum. Bila Anda menyorotkan lampu senter ke dinding kiri, misalnya, sorot cahaya tersebut mendapat energi setiap kali ia muncul dari dinding kanan. Sorot cahaya menjadi teringsutbirukan—yaitu, menjadi lebih energetik hingga mencapai energi tak terhingga, yang mana adalah mustahil. Atau, sorot cahaya menjadi begitu energetik sehingga menciptakan medan gravitasi dahsyatnya sendiri yang mengkolapskan kamar tidur/*wormhole*. Di samping itu, seseorang bisa memperlihatkan bahwa sesuatu yang disebut tensor energi-momentum, yang mengukur kandungan energi dan materi ruang, menjadi tak terhingga karena radiasi dapat menembus kedua dinding melewati waktu tak terhingga.

Menurut Hawking, ini adalah serangan penghabisan terhadap perjalanan waktu—efek-efek radiasi quantum bertambah hingga menjadi tak terhingga, menimbulkan divergensi (percabangan), membunuh pelancong waktu, dan menutup *wormhole*.

Sejak makalah Hawking, pertanyaan penyimpangan yang dia angkat telah membangkitkan diskusi yang bergairah dalam literatur fisika, di mana para ilmuwan mengambil posisi pro dan kontra terkait

perlindungan kronologi. Nyatanya, beberapa ilmuwan mulai menemukan jalan keluar pada bukti Hawking dengan melakukan pemilihan yang sesuai untuk *wormhole*, dengan mengubah ukurannya, panjangnya, dan sebagainya. Mereka menemukan bahwa dalam beberapa solusi *wormhole*, tensor energi-momentum memang faktanya berdivergensi, tapi pada solusi lain dirumuskan dengan baik. Fisikawan Rusia Sergei Krasnikov menguji pertanyaan divergensi untuk beragam tipe *wormhole* ini dan menyimpulkan bahwa "tidak ada bukti yang mengindikasikan bahwa mesin waktu pasti tidak stabil."

Sejauh ini gelombang pasang telah berayun ke arah lain yang bertentangan dengan Hawking sampai-sampai fisikawan Princeton, Li-Xin Li, mengajukan *anti*-penaksiran perlindungan kronologi: "Tidak ada hukum fisika yang menghalangi munculnya kurva mirip-waktu tertutup."

Pada 1998, Hawking terpaksa melakukan semacam penarikan. Dia menulis, "Fakta bahwa tensor energi-momentum tidak berdivergensi [dalam kasus tertentu] menunjukkan bahwa reaksi balik tidak mengharuskan perlindungan kronologi." Ini tidak berarti bahwa perjalanan waktu adalah mungkin, cuma berarti bahwa pemahaman kita masih belum lengkap. Fisikawan Matthew Visser melihat kegagalan perkiraan Hawking "bukan sebagai pemulihan nama baik bagi para peminat perjalanan waktu, tapi lebih sebagai indikasi bahwa penyelesaian isu perlindungan kronologi memerlukan teori gravitasi quantum yang dikembangkan secara utuh."

Hari ini, Hawking tidak lagi mengatakan bahwa perjalanan waktu adalah mustahil sama sekali, cuma mengatakan bahwa itu sangat tidak mungkin dan tidak dapat dilakukan. Kemungkinan perjalanan waktu teramat kecil. Tapi seseorang tidak dapat mengesampingkannya sama sekali. Jika seseorang bisa, dengan suatu cara, memanfaatkan energi positif dan negatif dalam jumlah besar dan memecahkan persoalan stabilitas, perjalanan waktu betul-betul mungkin dilakukan. (Dan barangkali alasan mengapa kita tidak dibanjiri oleh turis dari masa depan adalah bahwa masa paling lampau yang bisa mereka datangi adalah masa ketika mesin waktu dibuat, dan barangkali mesin waktu tersebut belum dibuat.)

Mesin Waktu Gott

Pada 1991, J. Richard Gott III dari Princeton mengajukan solusi lain lagi untuk persamaan Einstein yang memperkenankan perjalanan waktu. Pendekatannya menarik karena dia memulai dari pendekatan yang sama sekali segar, membuang objek-objek yang berputar, *wormhole*, dan energi negatif sama sekali.

Gott dilahirkan di Louisville, Kentucky, pada 1947, dan dia masih berbicara dengan aksen selatan lemah lembut yang terasa sedikit eksotis di dunia fisika teoritis murni yang kacau dan kasar. Dia mengawali dunia sainsnya sebagai anak-anak ketika bergabung dengan klub astronomi amatir dan menikmati pengamatan bintang.

Saat di SMU, dia memenangkan kontes bergengsi Westinghouse Science Talent Search dan sejak saat itu bergabung dengan kontes

tersebut, bertindak sebagai ketua juri selama bertahun-tahun. Setelah lulus dari Harvard dalam bidang matematika, dia melanjutkan ke Princeton, di mana dia hingga kini masih bekerja.

Saat melakukan penelitian kosmologi, dia menjadi tertarik kepada "string kosmik", relik *big bang* yang diprediksikan oleh banyak teoris. String kosmik mungkin mempunyai lebar yang lebih tipis dari nukleus atom, tapi massa mereka dapat berskala bintang dan mereka dapat membentang jutaan tahun-cahaya di angkasa. Gott pertama-tama menemukan solusi persamaan Einstein yang memperkenankan string kosmik. Tapi kemudian dia memperhatikan sesuatu yang tidak biasa mengenai string-string kosmik ini. Bila Anda mengambil dua string kosmik dan menembakkan mereka ke arah satu sama lain, maka, persis sebelum mereka bertubrukan, Anda dapat menggunakan ini sebagai mesin waktu. Pertama, dia menemukan bahwa jika Anda melakukan perjalanan bulat mengeliling string kosmik yang bertubrukan, ruang berkontraksi, memberinya sifat aneh. Kita tahu bahwa bila kita bergerak mengelilingi sebuah meja, misalnya, dan kembali ke titik di mana kita memulai, kita telah menempuh 360 derajat. Tapi ketika sebuah roket bergerak mengelilingi dua string kosmik sewaktu mereka saling berpapasan, ia sebenarnya menempuh kurang dari 360 derajat, karena ruang telah menyusut. (Ini memiliki topologi kerucut. Jika kita bergerak mengelilingi kerucut secara penuh, kita juga menemukan bahwa kita menempuh kurang dari 360 derajat.) Jadi, dengan mengelilingi kedua string secara cepat, Anda bisa betul-betul melampaui kecepatan cahaya (menurut penglihatan seorang

pengamat) karena jarak totalnya kurang dari yang diperkirakan. Namun, ini tidak melanggar relativitas khusus, karena menurut kerangka diri Anda, roket Anda tak pernah melampaui kecepatan cahaya.

Tapi ini juga berarti bahwa jika Anda mengelilingi string-string kosmik yang bertubrukan, Anda bisa melakukan perjalanan ke masa lalu. Gott mengenang, "Saat menemukan solusi ini, saya sungguh bergairah. Solusi ini hanya menggunakan materi berdensitas positif, bergerak pada kecepatan yang lebih rendah dari kecepatan cahaya. Kontrasnya, solusi *wormhole* membutuhkan material berdensitas energi negatif yang lebih eksotis (sesuatu yang berbobot kurang dari nol)."

Tapi energi yang dibutuhkan untuk mesin waktu sangatlah besar. "Untuk memungkinkan perjalanan waktu ke masa lalu, string-string kosmik dengan massa-per-satuan-panjang sekitar 10 juta miliar per centimeter harus bergerak ke arah saling berlawanan pada kecepatan sekurangnya 99,999999996% kecepatan cahaya. Kita telah mengamati proton *high-energy* di alam semesta yang bergerak setidaknya secepat ini, jadi kecepatan demikian adalah mungkin," tinjaunya.

Beberapa kritikus telah menjelaskan bahwa string kosmik adalah langka, seandainya mereka memang eksis, dan string-string kosmik yang bertubrukan bahkan lebih langka lagi. Jadi Gott mengajukan usulan berikut. Sebuah peradaban maju mungkin menemukan satu string kosmik di ruang angkasa. Menggunakan kapal antariksa raksasa dan peralatan besar, mereka dapat membentuk ulang string itu

menjadi simpal bujur sangkar yang sedikit tertekuk (menyerupai bentuk kursi sandar). Simpal tersebut, hipotesisnya, kolaps akibat gravitasinya sendiri, sehingga dua potongan lurus string kosmik itu terbang saling berpapasan mendekati kecepatan cahaya, menciptakan mesin waktu secara singkat. Walau demikian, Gott mengakui, "Simpal string kolaps yang cukup besar untuk memungkinkan Anda mengitarinya dan pergi ke masa setahun lalu harus lebih dari separuh massa-energi sebuah galaksi."

Paradoks Waktu

Secara tradisional, alasan lain mengapa fisikawan mengabaikan ide perjalanan waktu adalah lantaran adanya paradoks waktu. Contoh, jika Anda pergi ke masa lalu dan membunuh orangtua Anda sebelum Anda dilahirkan, maka kelahiran Anda adalah mustahil. Oleh karenanya, Anda takkan mungkin pergi ke masa lalu untuk membunuh orangtua Anda. Ini penting, sebab sains didasarkan pada ide-ide yang konsisten secara logika; paradoks waktu yang tulen akan cukup untuk sepenuhnya menyingkirkan perjalanan waktu.

Paradoks-paradoks perjalanan waktu ini bisa dikelompokkan ke dalam beberapa kategori:

Paradoks leluhur. Dalam paradoks ini, Anda mengubah masa lalu yang sedikit-banyak menjadikan masa kini mustahil. Contoh, dengan pergi ke masa sangat lampau untuk menemui dinosaurus, Anda secara tak sengaja menginjak mamalia kecil berbulu yang merupakan leluhur manusia. Dengan membinasa-

kan leluhur Anda, Anda secara logika tidak mungkin eksis.

Paradoks informasi. Dalam paradoks ini, informasi datang dari masa depan, artinya tidak memiliki sumber. Contoh, katakanlah seorang ilmuwan menciptakan mesin waktu dan kemudian pergi ke masa lalu untuk memberikan rahasia perjalanan waktu kepada dirinya sendiri saat muda. Rahasia perjalanan waktu tersebut tidak memiliki sumber, karena mesin waktu yang dimiliki sang ilmuwan muda bukan diciptakan olehnya tapi diserahkan kepadanya oleh dirinya yang lebih tua.

Paradoks Bilker. Dalam paradoks jenis ini, seseorang mengetahui masa depan dan melakukan sesuatu yang menjadikan masa depan mustahil. Contoh, Anda membuat mesin waktu untuk membawa Anda ke masa depan, dan Anda melihat bahwa Anda ditakdirkan menikahi seorang wanita bernama Jane. Namun, untuk mencoba-coba, Anda malah menikahi Helen, dengan demikian menjadikan masa depan Anda sendiri mustahil.

Paradoks jenis kelamin. Dalam paradoks ini, Anda adalah ayah Anda sendiri, yang mana merupakan kemustahilan biologis. Dalam sebuah kisah yang ditulis oleh filsuf Inggris Jonathan Harrison, sang pahlawan dalam cerita bukan hanya ayah untuk dirinya sendiri, tapi juga mengkanibal dirinya sendiri. Dalam kisah klasik karangan Robert Heinlein, "*All You Zombies*", sang pahlawan secara sekaligus adalah ibu, ayah, saudara perempuan, dan puteranya sendiri—dengan kata lain, pohon keluarga sampai pada dirinya. (Lihat catatan untuk detilnya.

Mengurai paradoks jenis kelamin sebetulnya agak sulit, membutuhkan pengetahuan tentang perjalanan waktu dan mekanika DNA.)

Dalam *The End of Eternity,* Isaac Asimov membayangkan "polisi waktu" yang bertanggung jawab mencegah paradoks-paradoks ini. Film *Terminator* bergantung kepada paradoks informasi—sebuah mikrochip yang ditemukan dari robot masa depan dipelajari oleh ilmuwan, yang kemudian menciptakan ras robot yang menjadi sadar dan mengambil alih dunia. Dengan kata lain, desain untuk super robot ini tidak pernah diciptakan oleh penemu; melainkan berasal dari potongan puing yang tersisa dari salah satu robot masa depan. Dalam film *Back to the Future,* Michael J. Fox berusaha menghindari paradoks moyang ketika dia pergi ke masa lalu dan bertemu ibunya saat masih remaja, yang jatuh cinta kepadanya. Tapi jika sang ibu menolak rayuan ayah masa depan Fox, maka eksistensi Fox terancam.

Para penulis naskah tak segan melanggar hukum fisika dalam membuat film *blockbuster* Hollywood. Tapi di komunitas fisika, paradoks-paradoks semacam itu dipikirkan secara sangat serius. Solusi untuk paradoks ini harus sesuai dengan relativitas dan teori quantum. Contoh, agar sesuai dengan relativitas, sungai waktu tidak boleh berakhir. Anda tidak boleh membendung sungai waktu. Waktu, menurut relativitas umum, direpresentasikan dengan permukaan lembut dan tanpa ujung dan tidak boleh koyak atau robek. Ia boleh berubah topologi, tapi tidak boleh berhenti. Artinya bila Anda membunuh orangtua Anda sebelum Anda dilahirkan, Anda tidak boleh

menghilang begitu saja. Ini akan melanggar hukum fisika.

Sekarang ini, fisikawan tengah berkerumun di seputar dua solusi potensial untuk paradoks waktu ini. Pertama, kosmolog Rusia, Igor Novikov, percaya bahwa kita dipaksa untuk bertindak dengan suatu cara yang menyebabkan paradoks tidak terjadi. Pendekatannya dikenal sebagai *self-consistency school*. Bila sungai waktu menikung balik dirinya secara lembut dan menciptakan pusaran air, dia menyatakan bahwa suatu macam "tangan tak terlihat" akan mengintervensi jika kita hendak melompat ke masa lalu dan hendak menciptakan paradoks waktu. Tapi pendekatan Novikov menghadirkan persoalan kehendak bebas. Jika kita pergi ke masa lalu dan menemui orangtua kita sebelum kita dilahirkan, kita mungkin berpikir bahwa kita mempunyai kehendak bebas dalam tindakan kita; Novikov percaya bahwa suatu hukum fisika yang belum diketemukan mencegah setiap tindakan yang akan mengubah masa depan (seperti membunuh orangtua Anda atau mencegah kelahiran Anda). Dia mencatat, "Kita tidak mungkin mengirim seorang pelancong waktu kembali ke Taman Eden untuk meminta Hawa agar tidak memungut apel dari pohonnya."

Apakah gaya misterius yang mencegah kita mengubah masa lalu dan menciptakan paradoks ini? "Pembatasan terhadap kehendak bebas kita semacam itu tidak biasa dan misterius tapi tidak sepenuhnya tanpa keparalelan," tulisnya. "Contoh, saya bebas berjalan di atas atap tanpa bantuan perlengkapan khusus. Hukum gravitasi mencegah saya melakukan ini; saya akan jatuh jika saya mencobanya,

jadi kehendak bebas saya dibatasi."

Tapi paradoks waktu bisa terjadi manakala materi mati (tanpa kehendak bebas sama sekali) dilemparkan ke masa lalu. Mari kita andaikan bahwa persis sebelum pertempuran bersejarah antara Alexander the Great dan Darius III dari Persia pada tahun 330 SM, Anda mengirim senjata mesin ke masa lampau, memberikan instruksi cara penggunaannya. Kita berpotensi mengubah seluruh sejarah Eropa berikutnya (dan mungkin mendapati diri kita berbicara bahasa Persia, bukan Eropa).

Kenyataannya, gangguan sekecil apa pun terhadap masa lalu dapat menimbulkan paradoks tak terduga di masa kini. *Chaos theory*, misalnya, memakai metafora "*butterfly effect*". Pada masa kritis pembentukan cuaca Bumi, kibaran sayap seekor kupu-kupu pun dapat mengeluarkan riakan/desiran yang bisa memiringkan keseimbangan gaya dan menimbulkan badai hebat. Objek mati terkecil yang dikirim ke masa lampau pun tak pelak lagi akan mengubah masa lalu dengan cara yang tidak bisa diprediksi, mengakibatkan paradoks waktu.

Cara kedua untuk memecahkan paradoks waktu ini adalah apabila sungai waktu bercabang secara halus menjadi dua sungai, atau anak sungai, membentuk dua alam semesta berbeda. Dengan kata lain, jika Anda hendak pergi ke masa lalu dan menembak orangtua Anda sebelum Anda dilahirkan, Anda akan membunuh orang di alam semesta lain yang secara genetis sama dengan orangtua Anda, alam semesta yang takkan pernah menjadi tempat lahir Anda. Tapi orangtua Anda di alam semesta asli Anda tidak akan terpengaruh.

Hipotesis kedua ini disebut "teori *many worlds*"—ide bahwa mungkin saja eksis semua dunia quantum potensial. Ini menyingkirkan divergensi tak terhingga yang ditemukan oleh Hawking, sebab radiasi tidak berulang kali menerobos *wormhole* seperti di ruang Misner. Ia hanya menerobos sekali. Setiap kali ia melewati *wormhole*, ia memasuki alam semesta baru. Dan paradoks ini mengarah ke pertanyaan yang barangkali terdalam dalam teori quantum: bagaimana bisa seekor kucing mati dan hidup pada waktu yang sama?

Untuk menjawab pertanyaan ini, fisikawan terpaksa mengadakan dua solusi memalukan: terdapat suatu kesadaran kosmik yang mengawasi kita semua, atau terdapat alam semesta quantum dalam jumlah tak terhingga.

Bab 6
Alam Semesta Quantum Paralel

Tak salah kalau saya mengatakan bahwa tak ada seorang pun yang memahami mekanika quantum.

—Richard Feynman

Seseorang yang tidak terguncang oleh teori quantum berarti tidak memahaminya.

—Niels Bohr

Infinite Improbability Drive adalah metode baru yang menakjubkan untuk menyeberangi jarak antarbintang dalam waktu sepernol detik saja, tanpa memerlukan kotoran membosankan tentang *hyperspace* itu.

—Douglas Adams

Dalam novel sains fiksi gila, tidak sopan, dan laris karangan Douglas Adams, *Hitchhiker's Guide to the Galaxy*, si pahlawan menemukan metode paling cerdik untuk bepergian menuju bintang-bintang. Bukannya menggunakan *wormhole*, *hyperdrive*, atau portal dimensi untuk bepergian antar galaksi, dia berpikir memanfaatkan prinsip ketidakpastian untuk melesat menyeberangi luasnya ruang

antargalaksi. Bila kita dengan suatu cara bisa mengendalikan probabilitas peristiwa-peristiwa improbabel tertentu, maka segala sesuatu, termasuk perjalanan melebihi kecepatan cahaya, dan bahkan perjalanan waktu, menjadi mungkin. Menjangkau bintang-bintang jauh dalam hitungan detik sangat tidak mungkin, tapi manakala seseorang bisa mengendalikan probabilitas quantum sekehendak hati, maka sesuatu yang mustahil sekali pun bisa menjadi lumrah.

Teori quantum didasarkan pada ide bahwa semua kemungkinan peristiwa memiliki probabilitas untuk terjadi, tak peduli seberapa fantastik atau pandirnya peristiwa itu. Ini, pada gilirannya, terletak di jantung teori alam semesta berinflasi—ketika *big bang* awal terjadi, terdapat transisi quantum menuju status baru di mana alam semesta tiba-tiba berinflasi luar biasa besar. Keseluruhan alam semesta kita, kelihatannya, muncul dari lompatan—yang sangat tidak mungkin—quantum. Walaupun Adams menulis dengan bergurau, kita fisikawan menyadari bahwa bila kita bisa, dengan suatu cara, mengendalikan probabilitas-probabilitas ini, seseorang bisa melakukan perbuatan luar biasa yang tak dapat dibedakan dari sulap. Tapi untuk saat ini, pengubahan probabilitas peristiwa berada jauh di luar jangkauan teknologi kita.

Saya terkadang mengajukan pertanyaan sederhana kepada mahasiswa Ph.D. kami di universitas, seperti misalnya, kalkulasikan probabilitas bahwa diri mereka akan tiba-tiba lenyap dan mewujud kembali (*rematerialize*) di sisi lain sebuah dinding batu bata. Menurut teori quantum, terdapat probabilitas kecil, namun dapat dikalkulasi,

bahwa ini bisa terjadi. Atau, sebetulnya, bahwa kita akan lenyap di ruang tinggal rumah kita dan berakhir di Mars. Menurut teori quantum, seseorang pada prinsipnya dapat secara tiba-tiba mewujud kembali di planet merah tersebut. Tentu saja, probabilitasnya begitu kecil sehingga kita harus menanti lebih lama dari umur alam semesta. Alhasil, dalam kehidupan sehari-hari kita, kita bisa mengabaikan peristiwa seimprobabel itu. Tapi di level subatom, probabilitas semacam itu sangat krusial untuk keberfungsian alat elektronik, komputer, dan laser.

Elektron, kenyataannya, lenyap (*dematerialize*) secara teratur dan mendapati diri mereka mewujud kembali (*rematerialize*) di sisi lain dinding di dalam komponen-komponen PC dan CD Anda. Peradaban modern akan runtuh, kenyataannya, jika elektron-elektron tidak diperkenankan berada di dua tempat pada waktu yang sama. (Molekul-molekul tubuh kita juga akan kolaps tanpa prinsip ganjil ini. Bayangkan dua tata surya bertubrukan di ruang angkasa, mematuhi hukum gravitasi Newton. Tata surya yang bertubrukan itu akan kolaps menjadi secampur-adukan planet-planet dan asteroid-asteroid yang *chaos*. Demikian pula, bila atom-atom mematuhi hukum Newton, mereka akan berdisintegrasi kapan pun mereka menubruk atom lain. Yang menjaga dua atom tetap terkunci dalam sebuah molekul stabil adalah fakta bahwa elektron-elektron dapat secara simultan berada di begitu banyak tempat pada waktu yang sama sehingga membentuk "awan" elektron yang mengikat atom-atom. Dengan demikian, alasan mengapa molekul-molekul bersifat stabil dan alam semesta tidak

berdisintegrasi adalah bahwa elektron-elektron bisa berada di banyak tempat pada waktu yang sama.)

Tapi jika elektron bisa eksis dalam status paralel yang melayang antara eksis dan tak eksis, maka mengapa alam semesta tidak? Bagaimanapun juga, pada satu titik, alam semesta pernah lebih kecil dari elektron. Sekali kita memperkenalkan kemungkinan penerapan prinsip quantum pada alam semesta, kita terpaksa mempertimbangkan adanya alam semesta paralel.

Kemungkinan inilah persisnya yang digali dalam kisah sains fantasi menggelisahkan karangan Phillip K. Dick, *The Man in the High Castle*. Menurut buku tersebut, terdapat sebuah alam semesta lain yang terpisah dari alam semesta kita lantaran satu peristiwa penting. Pada 1933, di alam semesta tersebut, sejarah dunia berubah tatkala sebuah peluru seorang pembunuh bayaran menewaskan Presiden Roosevelt pada tahun pertama jabatannya. Wakil Presiden Garner mengambil alih dan menetapkan kebijakan isolasionis yang memperlemah Amerika Serikat secara militer. Tak siap menghadapi serangan terhadap Pearl Harbor, dan tak mampu pulih dari kehancuran seluruh armada AS, pada 1947 AS terpaksa menyerah kepada Jerman dan Jepang. AS akhirnya terpecah menjadi tiga bagian: Reich Jerman menguasai pantai timur, Jepang menguasai pantai barat, dan *buffer state*[6] Rocky Mountain yang tak tenang di antaranya. Di alam semesta paralel ini, sesosok misterius menulis sebuah buku, berjudul *The Grasshoper Lies Heavy*, berlandaskan dialog dalam Bibel, yang mana dilarang oleh Nazi. Buku itu membahas alam semesta lain di mana

[6] Negara kecil yang letaknya di antara dua negara besar yang bermusuhan—penj.

Roosevelt tidak dibunuh, dan AS dan Inggris mengalahkan Nazi. Misi pahlwan wanita dalam kisah ini adalah untuk mengetahui apakah ada kebenaran di alam semesta lain di mana berlaku demokrasi dan kebebasan, ketimbang tirani dan rasisme.

Twilight Zone

Dunia *The Man in the High Castle* dan dunia kita hanya dipisahkan oleh kecelakaan kecil, sebuah peluru seorang pembunuh bayaran. Namun, mungkin juga bahwa dunia paralel dipisahkan dari dunia kita oleh peristiwa potensial terkecil: peristiwa quantum tunggal, tubrukan sinar kosmik.

Dalam salah satu episode serial televisi *Twilight Zone*, seorang pria bangun dari tidur dan mendapati isterinya tidak mengenalinya. Sang isteri berteriak kepadanya agar pergi sebelum dia memanggil polisi. Ketika pria itu berkeliling kota, dia mendapati bahwa teman-teman seumur hidupnya juga tidak mengenalinya, seakan-akan dia tidak pernah ada. Akhirnya, dia mendatangi rumah orangtuanya dan lalu terkejut setengah mati. Orangtuanya menyatakan tidak pernah melihat dia sebelumnya dan tidak pernah mempunyai seorang anak laki-laki. Tanpa teman, keluarga, atau rumah, dia berkeluyuran di kota tanpa tujuan, sampai akhirnya tertidur di bangku taman, layaknya seorang tunawisma. Saat dia terbangun keesokan harinya, dia mendapati dirinya sedang berada di ranjang dengan nyaman bersama isterinya. Namun, ketika sang isteri membalik badan, dia terkejut mendapati bahwa wanita itu bukanlah isterinya sama sekali,

melainkan seorang wanita asing yang belum pernah dia lihat sebelumnya.

Apakah kisah setidak masuk akal itu mungkin terjadi? Mungkin. Seandainya tokoh protagonis dalam *The Twilight Zone* tersebut menanyakan beberapa pertanyaan menyingkap kepada ibunya, dia mungkin akan mendapati bahwa sang ibu mengalami keguguran dan karenanya tidak pernah memiliki anak laki-laki. Terkadang sinar kosmik tunggal, partikel tunggal dari angkasa luar, dapat menghantam jauh ke dalam DNA di dalam janin dan menyebabkan mutasi yang akhirnya akan mengakibatkan keguguran. Dalam kasus demikian, peristiwa quantum tunggal dapat memisahkan dua dunia, satu di mana Anda tinggal sebagai warga produktif normal, dan satu lainnya yang persis identik, kecuali bahwa Anda tidak pernah terlahir.

Ketergelinciran di antara dunia-dunia ini berada dalam jangkauan hukum fisika. Tapi itu amat tidak mungkin; probabilitas untuk terjadinya sangat kecil. Tapi sebagaimana bisa Anda lihat, teori quantum memberi kita gambaran alam semesta yang jauh lebih aneh daripada gambaran yang diberikan oleh Einstein. Menurut relativitas, panggung kehidupan tempat kita tampil mungkin terbuat dari karet, dengan aktor-aktor yang bergerak di jalur melengkung sewaktu mereka melintasi set panggung. Sebagaimana dalam dunia Newton, aktor-aktor dalam dunia Einstein meniru dialog mereka dari naskah yang telah ditulis sebelumnya. Tapi dalam sandiwara quantum, para aktor tiba-tiba membuang naskah dan berakting atas kemauan mereka sendiri. Para boneka memutus benang pengendali mereka. Kehendak

bebas telah ditegakkan. Para aktor bisa menghilang dan muncul kembali dari panggung. Yang lebih aneh lagi, mereka bisa mendapati diri mereka muncul di dua tempat pada waktu yang sama. Para aktor, saat membacakan dialog mereka, tak pernah tahu pasti apakah mereka sedang berbicara dengan seseorang yang dapat tiba-tiba menghilang dan muncul kembali di tempat lain.

Monster Pemikir: John Wheeler

Kecuali untuk Einstein dan Bohr, tak ada manusia yang pernah bergulat lebih dalam dengan keabsurdan dan keberhasilan teori quantum dibanding John Wheeler. Apakah semua realitas fisik adalah ilusi belaka? Apakah alam semesta quantum paralel eksis? Di masa lalu, ketika dirinya tidak sedang memikirkan paradoks-paradoks quantum yang saling mempengaruhi ini, Wheeler mengaplikasikan probabilitas ini untuk membuat bom atom dan bom hidrogen dan mempelopori studi *black hole*. John Wheeler adalah raksasa terakhir, atau "monster pemikir", sebagaimana julukan yang suatu kali diberikan oleh mahasiswanya, Richard Feynman, kepada orang-orang yang bergumul dengan kesimpulan gila teori quantum.

Wheeler-lah yang menciptakan istilah *black hole* pada 1967 dalam sebuah konferensi di Goddard Institute for Space Studies NASA di New York City setelah penemuan pulsar pertama.

Wheeler dilahirkan pada 1911 di Jacksonville, Florida. Ayahnya merupakan seorang pustakawan, tapi ilmu teknik mendarah daging di keluarganya. Tiga pamannya adalah insinyur pertambangan dan

sering memakai bahan peledak dalam pekerjaan mereka. Ide penggunaan dinamit membuat dirinya terkagum, dan dia senang menyaksikan ledakan. (Suatu hari, dia secara ceroboh bereksperimen dengan sepotongan dinamit dan tak sengaja meledak di tangannya, menerbangkan bagian ibu jarinya dan ujung salah satu jarinya. Secara kebetulan, ketika masih menjadi mahasiswa, sebuah ledakan serupa terjadi di tangan Einstein akibat kecerobohan, mengharuskan beberapa jahitan.)

Wheeler adalah anak yang dewasa sebelum waktunya, menguasai kalkulus, dan melahap setiap buku yang dia temukan mengenai teori baru yang ramai dibicarakan teman-temannya: mekanika quantum. Persis di depan matanya, sebuah teori baru sedang dikembangkan di Eropa oleh Niels Bohr, Werner Heisenberg, dan Erwin Schrödinger yang tiba-tiba membuka kunci rahasia-rahasia atom. Baru beberapa tahun sebelumnya, para pengikut filsuf Ernst Mach memperolok eksistensi atom, menyatakan bahwa atom tak pernah teramati di laboratorium dan barangkali hanya fiksi. Yang tidak bisa dilihat barangkali tidaklah eksis, klaim mereka. Fisikawan besar Jerman, Ludwig Boltzmann, yang menetapkan hukum termodinamika, melakukan bunuh diri pada 1906, sebagian disebabkan oleh beratnya ejekan yang dia hadapi saat mempromosikan konsep atom.

Kemudian, dalam beberapa tahun yang penting, dari 1925 sampai 1927, rahasia atom jatuh terguling-guling. Belum pernah dalam sejarah modern (kecuali untuk tahun 1905, dengan karya Einstein) tercapai terobosan sebesar ini dalam waktu begitu singkat. Wheeler ingin

menjadi bagian dari revolusi ini. Tapi dia sadar bahwa Amerika Serikat terbelakang dalam fisika; tidak ada satu pun fisikawan kelas dunia di antara barisannya. Seperti J. Robert Oppenheimer sebelum dirinya, Wheeler meninggalkan AS dan melancong ke Kopenhagen untuk belajar sendiri dari sang master, Niels Bohr.

Eksperimen terdahulu mengenai elektron-elektron mendemonstrasikan bahwa mereka bertindak sebagai partikel maupun gelombang. Dualitas aneh di antara partikel dan gelombang ini akhirnya diurai oleh para fisikawan quantum: elektron, dalam dansanya mengelilingi atom, terlihat sebagai partikel, tapi ia diringi oleh gelombang misterius. Pada 1925, fisikawan Austria, Erwin Schrödinger, mengajukan sebuah persamaan (persamaan gelombang Schrödinger yang terkenal) yang secara akurat menjelaskan gerakan gelombang yang mengiringi elektron. Gelombang ini, dilambangkan dengan huruf *psi* Yunani, memberikan prediksi yang luar biasa tepat atas perilaku atom-atom yang mencetuskan revolusi dalam fisika. Mendadak, hampir dari prinsip pertama, seseorang dapat mengintai bagian dalam atom sendiri untuk mengkalkulasi bagaimana elektron berdansa di orbitnya, membuat transisi, dan mengikat atom-atom dalam molekul.

Sebagaimana bualan fisikawan quantum Paul Dirac, fisika akan segera mereduksi seluruh ilmu kimia menjadi ilmu teknik belaka. Dia menyatakan, "Dengan demikian, hukum-hukum fisika dasar yang dibutuhkan untuk teori matematis sebagian besar fisika dan seluruh kimia telah diketahui sepenuhnya, dan satu-satunya kesulitan adalah

bahwa penerapan hukum ini menghasilkan persamaan-persamaan yang terlampau rumit untuk bisa dipecahkan." Seberapa spektakuler pun fungsi *psi* ini, ia masih merupakan misteri atas apa yang diwakilinya.

Akhirnya, pada 1928, fisikawan Max Born mengajukan ide bahwa fungsi gelombang ini mewakili probabilitas penemuan elektron di titik tertentu. Dengan kata lain, Anda takkan pernah bisa tahu pasti di mana sebuah elektron persisnya berada; yang bisa Anda lakukan hanya mengkalkulasi fungsi gelombangnya, yang memberitahu Anda probabilitas keberadaannya. Lantas, bila fisika atom bisa direduksi menjadi gelombang probabilitas keberadaan sebuah elektron, dan bila sebuah elektron bisa terlihat berada di dua tempat pada waktu yang sama, bagaimana kita menetapkan di mana elektron tersebut sebetulnya berada?

Bohr dan Heisenberg akhirnya merumuskan set resep lengkap dalam buku masak quantum yang telah bekerja secara menawan dalam eksperimen-eksperimen atom dengan presisi luar biasa. Fungsi gelombang hanya memberitahu Anda probabilitas lokasi elektron. Jika fungsi gelombangnya besar di titik tertentu, artinya ada kemungkinan besar elektron terdapat di situ. (Jika kecil, maka kemungkinan kecil elektron bisa ditemukan di situ.) Contoh, jika kita bisa "melihat" fungsi gelombang seseorang, [fungsi] itu akan sungguh seperti orang tersebut sendiri. Bagaimanapun, fungsi gelombang juga merembes halus ke ruang angkasa, artinya ada kemungkinan kecil orang tersebut bisa ditemukan di bulan. (Kenyataannya, fungsi gelombang orang tersebut

betul-betul menyebar ke seluruh alam semesta.)

Ini berarti fungsi gelombang sebatang pohon bisa memberitahu Anda probabilitas bahwa ia sedang berdiri atau runtuh, tapi tidak dapat secara definitif memberitahu Anda dalam kondisi mana sebetulnya ia. Tapi akal sehat memberitahu kita bahwa objek-objek berada dalam kondisi definitif. Manakala Anda menatap sebatang pohon, pohon itu sudah pasti berada di depan Anda—entah berdiri atau runtuh, tapi tidak keduanya.

Untuk menyelesaikan selisih antara gelombang probabilitas dan pikiran akal sehat kita tentang eksistensi, Bohr dan Heisenberg berasumi bahwa setelah suatu pengukuran dilakukan oleh seorang pengamat luar, fungsi gelombang "kolaps" secara gaib, dan elektron jatuh ke dalam sebuah kondisi definitif—yakni, setelah menatap pohon, kita melihat bahwa ia betul-betul berdiri. *Dengan kata lain, proses pengamatan menentukan kondisi akhir elektron*. Pengamatan adalah sangat vital untuk eksistensi. Setelah kita menatap elektron, fungsi gelombangnya kolaps, sehingga elektron kini berada dalam kondisi definitif dan tidak ada kebutuhan lagi akan fungsi gelombang.

Jadi, postulat-postulat kawanan Kopenhagen-nya Bohr, secara longgar dapat diringkas sebagai berikut:

1. Semua energi terdapat dalam paket-paket tersendiri, yang disebut quantum. (Quantum cahaya, misalnya, adalah foton. Quantum gaya [nuklir] lemah disebut boson W dan boson Z, quantum gaya [nuklir] kuat disebut gluon, dan quantum gravitasi disebut graviton, yang masih harus diperiksa di

laboratorium.)

2. Materi direpresentasikan oleh partikel-partikel titik, tapi probabilitas penemuan partikel diperlihatkan oleh gelombang. Gelombang ini, pada gilirannya, mematuhi persamaan gelombang rinci (seperti persamaan gelombang Schrödinger).
3. Sebelum pengamatan dilakukan, sebuah objek eksis dalam semua kemungkinan kondisi secara bersamaan. Untuk menentukan dalam kondisi mana objek itu berada, kita harus melakukan pengamatan, yang "mengkolapskan" fungsi gelombangnya, dan objek itu memasuki kondisi definitif. Tindakan pengamatan merusak fungsi gelombang, dan objek kini memangku realitas definitif. Fungsi gelombang menjalankan maksudnya: ia memberi kita probabilitas akurat untuk menemukan objek dalam kondisi khusus.

Determinisme atau Ketidakpastian?

Teori quantum adalah teori fisika tersukses sepanjang masa. Rumusan tertinggi teori quantum adalah Standard Model, yang melambangkan buah eksperimen akselerator partikel selama berdekade-dekade. Sebagian dari teori ini telah diuji hingga 1 bagian dalam 10 miliar. Bila seseorang memasukkan massa neutrino, maka Standard Model konsisten dengan semua eksperimen partikel subatom, tanpa kecuali.

Tapi tak peduli seberapa sukses teori quantum ini, secara eksperimen ia didasarkan pada postulat-postulat yang telah melepaskan badai kontroversi filsafat dan teologis selama 80 tahun terakhir.

Postulat kedua, khususnya, telah menimbulkan kemarahan agama-agama karena menanyakan siapa yang memutuskan takdir kita. Di sepanjang zaman, para filsuf, teolog, dan ilmuwan tertarik dengan masa depan dan bertanya-tanya apakah, entah bagaimana caranya, takdir kita bisa diketahui. Dalam *Macbeth*-nya Shakespeare, Banquo, putus asa mengangkat tabir yang menutupi takdir kita, menyampaikan dialog terkenang berikut:

> *Jika kau mampu memandang benih-benih waktu*
> *dan menyebutkan butiran mana yang akan tumbuh dan yang tidak,*
> *maka berbincanglah denganku...*
> (babak 1, adegan 3)

Shakespeare menulis kata-kata ini pada 1606. Delapan tahun kemudian, seorang Inggris lain, Isaac Newton, dengan berani mengklaim bahwa dirinya mengetahui jawaban untuk pertanyaan kuno ini. Newton maupun Einstein meyakini konsep yang disebut determinisme (ketetapan/kepastian), yang menyatakan bahwa semua peristiwa masa depan pada prinsipnya bisa ditetapkan. Bagi Newton, alam semesta adalah jam raksasa yang diputar oleh Tuhan pada permulaan masa. Sejak saat itu, jam ini berdetak, mematuhi tiga hukum geraknya, dengan cara yang dapat diprediksi secara akurat. Matematikawan Prancis, Pierre Simon de Laplace, yang merupakan penasehat sains Napoleon, menulis bahwa, menggunakan hukum Newton, seseorang bisa memprediksikan masa depan dengan presisi yang sama seperti ketika memandang masa lalu. Dia menulis bahwa

jika suatu entitas bisa mengetahui posisi dan kecepatan semua partikel di alam semesta, "bagi intelek secerdas itu, tak ada yang tak pasti; dan masa depan, juga masa lalu, berada di hadapan matanya." Saat Laplace memberi Napoleon salinan karya hebatnya, *Celestial Mechanics*, sang kaisar berkata, "Kau telah menulis karya besar tentang angkasa ini tanpa satu kali pun menyebutkan Tuhan." Laplace menjawab, "Tuan, aku tak memerlukan hipotesis tersebut."

Bagi Newton dan Einstein, gagasan tentang kehendak bebas, bahwa kita adalah penguasa takdir kita, merupakan sebuah ilusi. Gagasan masuk akal tentang realitas ini, bahwa objek-objek konkret yang kita sentuh adalah nyata dan eksis dalam kondisi definitif, oleh Einstein disebut "realitas objektif". Dia sangat jelas mengungkapkan posisinya sebagai berikut:

> Saya adalah seorang determinis, dipaksa bertindak seolah-olah terdapat kehendak bebas, sebab jika saya ingin hidup dalam sebuah masyarakat beradab, saya harus bertindak secara bertanggung jawab. Saya tahu secara filosofis seorang pembunuh tidak bertanggung jawab atas kejahatannya, tapi saya tidak akan minum teh bersamanya. Karir saya telah ditentukan oleh berbagai gaya yang saya tidak punya kuasa atasnya, terutama kelenjar-kelenjar misterius itu di mana alam mempersiapkan esensi kehidupan. Henry Ford boleh menyebutnya Suara Batin, Socrates menyebutnya sebagai *daemon*[7]: tiap manusia menjelaskan fakta dengan caranya sendiri bahwa kehendak

7 Entitas supernatural dalam ajaran Yunani kuno—penj.

> manusia tidaklah bebas...Segala sesuatu itu ditetapkan...oleh gaya-gaya yang kita tak punya kuasa atasnya...pun bagi serangga dan bintang. Manusia, sayuran, atau debu kosmik, kita semua berdansa menurut tempo misterius, dilagukan di kejauhan oleh satu pemain tak nampak.

Teolog juga telah bergulat dengan pertanyaan ini. Sebagian besar agama dunia meyakini suatu bentuk takdir, ide bahwa Tuhan tak hanya mahakuasa (serba kuasa) dan mahaada (ada di mana-mana), tapi juga mahatahu (tahu segalanya, bahkan masa depan). Dalam beberapa agama, ini artinya Tuhan mengetahui apakah kita akan masuk surga atau neraka, bahkan sebelum kita lahir. Pada esensinya, terdapat "buku takdir" di suatu tempat di surga dengan semua nama kita terdaftar, mencakup tanggal lahir kita, kegagalan dan keberhasilan kita, kesenangan dan kesusahan kita, bahkan tanggal kematian kita, dan apakah kita akan hidup di surga atau dalam kutukan abadi.

(Pertanyaan teologis sulit tentang takdir ini, sebagian, membantu memecah gereja Katolik pada tahun 1517, ketika Martin Luther menempelkan 95 tesis mengenai gereja di Wittenberg. Di dalamnya, dia menyerang praktek penjualan *indulgence*[8] oleh gereja—pada esensinya adalah uang suap yang melapangkan jalan menuju surga bagi kaum kaya. Mungkin Luther mengatakan, Tuhan mengetahui masa depan kita dan nasib kita sudah ditakdirkan, tapi Tuhan tidak bisa dibujuk untuk berubah pikiran dengan memberi banyak donasi

8 Remisi hukuman yang dibayar setelah pengampunan dosa—penj.

kepada gereja.)

Tapi bagi fisikawan yang menerima konsep probabilitas, postulat yang paling kontroversial sejauh ini adalah postulat ketiga, yang telah membuat sakit kepala bergenerasi-generasi fisikawan dan filsuf. "Pengamatan" adalah konsep longgar dan tidak jelas. Selain itu, ia bersandar pada fakta bahwa sebetulnya terdapat dua tipe fisika: satu untuk dunia subatom yang ganjil, di mana elektron-elektron tampaknya bisa berada di dua tempat pada waktu yang sama, dan satu lainnya untuk dunia makroskopis yang kita tinggali, yang terlihat mematuhi hukum Newton yang masuk akal.

Menurut Bohr, terdapat suatu "dinding" tak tampak yang memisahkan dunia atom dari dunia makroskopis keseharian yang familiar. Sementara dunia atom mematuhi aturan ganjil teori quantum, kita menjalani kehidupan di luar dinding itu, di dunia penuh planet dan bintang yang terumuskan dengan baik di mana gelombang-gelombang telah kolaps.

Wheeler, yang mempelajari mekanika quantum dari pendirinya, gemar meringkas dua aliran pemikiran mengenai pertanyaan ini. Dia memberikan contoh berupa tiga orang wasit dalam permainan bisbol yang sedang merundingkan *point*[9] bisbol yang bagus. Dalam membuat keputusan, ketiga wasit mengatakan:

Wasit 1: Saya memutuskannya seolah-olah saya melihatnya.

Wasit 2: Saya memutuskannya sebagaimana adanya.

Wasit 3: Mereka tidak ada sampai saya memutuskannya.

---

9 Posisi pemain di belakang pemukul bola—penj.

Bagi Wheeler, wasit kedua adalah Einstein, yang mempercayai adanya realitas mutlak di luar pengalaman manusia. Einstein menyebut ini sebagai "realitas objektif", yaitu bahwa objek-objek dapat eksis dalam kondisi definitif tanpa intervensi manusia. Wasit ketiga adalah Bohr, yang berargumen bahwa realitas hanya eksis setelah pengamatan dilakukan.

Pepohonan di Hutan

Terkadang fisikawan memandang hina para filsuf, mengutip dari Roman Cicero, yang pernah berkata, "Tak ada hal absurd yang belum pernah diucapkan oleh filsuf." Matematikawan Stanislaw Ulam, yang mempunyai pandangan suram mengenai pemberian nama mulia pada konsep-konsep pandir, suatu kali berkata, "Kegilaan adalah kemampuan untuk membedakan secara halus berbagai jenis omong kosong." Einstein sendiri pernah menulis tentang filsafat, "Bukankah semua filsafat seolah-olah tertulis dengan manis? Terasa menakjubkan manakala seseorang merenungkannya, tapi ketika dia memandangnya lagi, semua itu hilang. Yang tersisa hanya omong kosong."

Fisikawan juga gemar menceritakan kisah meragukan yang diduga diceritakan oleh seorang presiden universitas yang menjadi jengkel saat memikirkan anggaran untuk fakultas fisika, matematika, dan filsafat. Diduga dia mengatakan, "Mengapa kalian fisikawan selalu memerlukan peralatan yang begitu mahal? Sedangkan Fakultas Matematika tak membutuhkan apa-apa selain kertas, pensil, dan tempat sampah kertas, dan Fakultas Filsafat masih lebih baik. Mereka

bahkan tidak meminta tempat sampah kertas."

Bagaimanapun, filsuf memang masih menang. Teori quantum masih belum lengkap dan bersandar pada landasan filosofis yang rapuh. Kontroversi quantum ini mendorong seseorang memeriksa kembali karya para filsuf seperti Bishop Berkeley, yang di abad 18 menyatakan bahwa objek-objek eksis hanya karena manusia mengamatinya, sebuah filsafat yang disebut *solipsism*[10] atau idealisme. Bila sebatang pohon di hutan runtuh, tapi tak ada yang berada di sana untuk melihatnya, maka ia sebetulnya tidak runtuh, demikian klaim mereka.

Nah kita mempunyai interpretasi quantum atas pepohonan yang runtuh di hutan. Sebelum pengamatan dilakukan, Anda tidak tahu apakah ia runtuh atau tidak. Faktanya, pohon eksis dalam semua kemungkinan kondisi secara bersamaan: ia bisa terbakar, runtuh, menjadi kayu bakar, serbuk kayu, dan sebagainya. Sekali pengamatan dilakukan, maka pohon mendadak memasuki kondisi definitif, dan kita melihat ia telah, misalnya, runtuh.

Membandingkan kesulitan filosofis relativitas dan teori quantum, Feynman pernah mengemukakan, "Terdapat satu masa ketika suratkabar mengatakan bahwa hanya 12 orang yang memahami teori relativitas. Saya tidak percaya pernah ada masa seperti itu... Di sisi lain, tak salah kalau saya mengatakan bahwa tak ada seorang pun yang memahami mekanika quantum." Dia menulis bahwa mekanika quantum "menguraikan alam sebagai sesuatu yang absurd dari sudut

[10] Teori filsafat yang menyatakan bahwa diri ialah sesuatu yang eksis dan dapat dikenali—penj.

pandang akal sehat. Dan itu cocok sepenuhnya dengan eksperimen. Jadi saya harap Anda bisa menerima alam apa adanya—absurd." Ini telah menimbulkan perasaan gelisah di kalangan banyak fisikawan, yang merasa seolah-olah diri mereka sedang menciptakan seluruh dunia berlandaskan tanah pasir yang berpindah. Steven Weinberg menulis, "Saya akui dengan tidak senang bahwa sepanjang perjalanan hidup saya dalam kerangka teoritis, tidak ada seorang pun yang paham sepenuhnya."

Dalam sains tradisional, pengamat mencoba senetral mungkin tetap terpisah dari dunia. (Sebagaimana dikatakan oleh seorang pelawak, "Kau selalu bisa melihat ilmuwan di klub telanjang, sebab dia adalah satu-satunya orang yang menyelidiki hadirin.") Tapi sekarang, untuk pertama kalinya, kita menyaksikan bahwa adalah mustahil untuk memisahkan pengamat dari yang diamati. Sebagaimana suatu kali dikemukakan oleh Max Planck, "Sains tidak bisa memecahkan misteri tertinggi Alam. Sebab menurut analisis terakhir, kita sendiri merupakan bagian dari misteri yang tengah coba kita pecahkan."

Persoalan Kucing

Erwin Schrödinger, yang pertama kali memperkenalkan persamaan gelombang, berpikir bahwa ini sudah keterlaluan. Dia mengaku kepada Bohr bahwa dirinya menyesal pernah mengajukan konsep gelombang jika itu memperkenalkan konsep probabilitas ke dalam fisika.

Untuk melumpuhkan ide probabilitas, dia mengajukan sebuah

eksperimen. Bayangkan seekor kucing yang terkurung dalam kotak. Di dalam kotak, terdapat sebotol gas beracun, tersambung dengan palu yang terhubung dengan *Geiger counter*[11] yang ditempatkan dekat sepotong uranium. Tak ada yang membantah bahwa peluruhan radioaktif atom uranium adalah murni sebuah peristiwa quantum yang tidak bisa diprediksi terlebih dahulu. Katakanlah ada kemungkinan 50% bahwa sebuah atom uranium akan meluruh pada detik berikutnya. Jika sebuah atom uranium meluruh, itu merangsang *Geiger counter*, yang menyebabkan palu merusak kaca [botol], membunuh si kucing. Sebelum Anda membuka kotak, mustahil untuk mengatakan apakah kucing itu mati atau hidup. Nyatanya, untuk menerangkan si kucing, fisikawan menambahkan fungsi gelombang kucing hidup dan kucing mati—dengan kata lain, kita menaruh si kucing di *underworld* dengan kemungkinan 50% mati dan 50% hidup secara serempak.

Sekarang buka kotak tersebut. Sekali kita mengintip ke dalam kotak, suatu pengamatan dijalankan, fungsi gelombang kolaps, dan kita melihat bahwa si kucing, katakanlah, hidup. Bagi Schrödinger, ini sangat pandir. Bagaimana mungkin seekor kucing mati dan hidup pada waktu yang sama, hanya karena kita belum menatapnya? Apakah ia tiba-tiba menjadi eksis segera setelah kita mengamatinya? Einstein juga jengkel dengan interpretasi ini. Setiap kali tamu datang ke rumahnya, dia akan mengatakan: tataplah bulan. Apakah ia tiba-tiba menjadi eksis ketika seekor tikus menatapnya? Einstein yakin jawabannya tidak. Tapi dalam beberapa hal, jawabannya bisa ya.

[11] Alat untuk mendeteksi dan mengukur keradioaktifan—penj.

Situasi memuncak pada tahun 1930 dalam sebuah perselisihan bersejarah antara Einstein dan Bohr di Solvay Conference. Wheeler di kemudian hari menyatakan bahwa itu adalah perdebatan terhebat yang pernah dia ketahui dalam sejarah intelektual. Dalam 30 tahun, dia tidak pernah mendengar perdebatan antara dua sosok besar mengenai satu isu mendalam dengan konsekuensi mendalam terhadap pemahaman alam semesta.

Einstein, yang selalu tegas, berani, dan amat fasih, mengeluarkan serangan "eksperimen pikiran" untuk melumpuhkan teori quantum. Bohr, yang tak henti menggumam, terguncang usai setiap serangan. Fisikawan Paul Ehrenfest mengenang, "Menakjubkan bagi saya untuk hadir dalam dialog antara Bohr dan E. E., seperti pemain catur, dengan contoh yang terus baru. Semacam *perpetuum mobile* kedua, sungguh-sungguh bermaksud menerobos ketidakpastian. Bohr selalu, dari awan asap filsafat, mencari alat untuk menghancurkan contoh satu demi satu. Einstein seperti *jack-in-the-box*[12], muncul dengan segar setiap pagi. Oh, itu sangat menyenangkan. Tapi terus terang saya hampir pro Bohr dan kontra E. Dia bersikap terhadap Bohr persis seperti sikap kampiun yang menang mutlak."

Terakhir, Einstein mengajukan sebuah eksperimen yang menurutnya akan menjadi serangan penghabisan terhadap teori quantum. Bayangkan sebuah kotak berisi gas foton. Jika kotak tersebut memiliki *shutter* (pengatur cahaya), ia dapat secara singkat melepaskan satu foton. Karena seseorang bisa mengukur kecepatan *shutter* secara akurat, dan juga mengukur energi foton, maka dia bisa menentukan

12 Sosok mainan yang muncul dari kotak—penj.

kondisi foton dengan presisi tak terhingga, dengan demikian melanggar prinsip ketidakpastian.

Ehrenfest menulis, "Bagi Bohr, ini adalah pukulan telak. Saat itu dia tidak melihat ada solusi. Dia amat tidak senang sepanjang malam itu, berjalan dari satu orang ke orang lain, mencoba meyakinkan mereka bahwa ini tidak benar, sebab jika E benar, maka berarti akhir fisika. Tapi dia tidak bisa berpikir untuk menyangkal. Saya takkan pernah melupakan penglihatan kedua lawan meninggalkan klub universitas. Einstein, seorang sosok besar, berjalan tenang dengan senyum tipis yang mengejek, sementara Bohr berderap di sampingnya, amat kecewa."

Ketika Ehrenfest kemudian bertemu dengan Bohr secara kebetulan, Bohr terkelu; yang dia lakukan hanya menggumamkan kata-kata yang sama berulang-ulang, "Einstein...Einstein...Einstein."

Keesokan harinya, setelah melewati malam yang tegang dan tidak bisa tidur, Bohr mampu menemukan cacat kecil dalam argumen Einstein. Setelah memancarkan foton, kotak itu sedikit lebih ringan, karena materi dan energi adalah ekuivalen. Artinya kotak itu sedikit bertambah berat di bawah gravitasi, sebab energi mempunyai berat, berdasarkan teori gravitasi Einstein sendiri. Tapi ini menimbulkan ketidakpastian pada energi foton. Jika seseorang kemudian mengkalkulasi ketidakpastian berat dan ketidakpastian kecepatan *shutter*, dia mendapati bahwa kotak itu persis mematuhi prinsip ketidakpastian. Praktisnya, Bohr memakai teori gravitasi Einstein sendiri untuk menyangkal Einstein! Bohr memperoleh kemenangan. Einstein kalah.

Saat Einstein kemudian mengeluh bahwa "Tuhan tidak bertaruh dengan dunia", Bohr dikabarkan menyerang balik, "Berhenti memerintah Tuhan tentang apa yang harus Dia lakukan." Akhirnya, Einstein mengakui bahwa Bohr telah berhasil menyangkal argumennya. Einstein di kemudian hari menulis, "Saya yakin teori ini niscaya mengandung sepotong kebenaran definitif." (Namun, Einstein memandang hina fisikawan yang tidak mengapresiasi paradoks halus yang melekat dalam teori quantum. Dia suatu kali menulis, "Tentu saja, hari ini setiap bajingan berpikir dirinya tahu jawabannya, padahal dia sedang menipu dirinya sendiri.")

Setelah perdebatan sengit ini dan perdebatan lainnya dengan para fisikawan quantum, Einstein akhirnya menyerah, tapi mengambil pendekatan berbeda. Dia mengakui teori quantum benar, tapi hanya dalam domain tertentu, hanya sebagai penaksiran terhadap kebenaran sesungguhnya. Sebagaimana relativitas yang menggeneralisir (tapi tidak menghancurkan) teori Newton, dia ingin menyerap teori quantum ke dalam sebuah teori yang lebih mumpuni dan lebih umum, *unified field theory*.

(Perdebatan ini, antara Einstein dan Schrödinger di satu pihak, dengan Bohr dan Heisenberg di pihak lain, tidak dapat diabaikan dengan mudah, sebab "eksperimen pikiran" ini sekarang bisa dijalankan di laboratorium. Walaupun para ilmuwan tidak bisa membuat seekor kucing terlihat mati dan hidup, mereka kini dapat memanipulasi tiap-tiap atom dengan nanoteknologi. Belakangan, eksperimen-eksperimen aneh ini dilakukan dengan Buckyball yang

mengandung 60 atom karbon, sehingga "dinding"—yang menurut ramalan Bohr memisahkan objek besar dari objek quantum—ambruk dengan cepat. Fisikawan eksperimen bahkan sekarang tengah merenungkan apa yang dibutuhkan untuk menunjukkan bahwa sebuah virus, yang terdiri dari ribuan atom, bisa berada di dua tempat pada waktu yang sama.)

Bom

Sayangnya, diskusi tentang paradoks sedap ini tersela oleh kenaikan Hitler pada 1933 dan ketergesaan untuk membangun bom atom. Selama bertahun-tahun diketahui, melalui persamaan $E = mc^2$ Einstein yang terkenal, bahwa di dalam atom terkunci gudang energi sangat besar. Tapi kebanyakan fisikawan tak mengindahkan ide bahwa kita mampu memanfaatkan energi ini. Bahkan Ernest Rutherford, orang yang menemukan nukleus atom, berkata, "Energi yang dihasilkan oleh pemecahan atom sangat kecil. Seseorang yang mengharapkan sumber tenaga dari pengubahan atom-atom ini hanya berbicara omong kosong."

Pada 1939, Bohr melakukan perjalanan menentukan ke AS, mendarat di New York untuk bertemu dengan mahasiswanya, John Wheeler. Dia membawa kabar tak menyenangkan: Otto Hahn dan Lise Meitner menunjukkan bahwa nukleus atom dapat dipecah dua, melepaskan energi, dalam proses yang disebut *fission* (fisi/pemecahan). Karena segala sesuatu dalam teori quantum adalah soal probabilitas dan kemungkinan, mereka mengestimasi probabilitas

sebuah neutron akan mencerai-beraikan nukleus uranium, melepaskan dua atau lebih neutron, yang kemudian memfisi lebih banyak lagi nukleus uranium, yang kemudian melepas lebih banyak lagi neutron, dan seterusnya, menimbulkan reaksi berantai yang sanggup meluluh-lantakkan sebuah kota modern. (Dalam mekanika quantum, Anda takkan pernah bisa tahu apakah neutron tertentu akan memfisi sebuah atom uranium, tapi Anda bisa menghitung—dengan akurasi luar biasa—probabilitas miliaran atom uranium akan mengalami fisi dalam sebuah bom. Itulah kekuatan mekanika quantum.)

Komputasi quantum mereka mengindikasikan bahwa sebuah bom atom bisa dibuat. Dua bulan kemudian, Bohr, Eugene Wigner, Leo Szilard, dan Wheeler bertemu di kantor lama Einstein di Princeton untuk membahas kemungkinan pembuatan bom atom. Bohr percaya bahwa untuk membuat bom atom diperlukan seluruh sumber daya sebuah bangsa. (Beberapa tahun kemudian, Szilard membujuk Einstein untuk menulis surat penting kepada Presiden Franklin Roosevelt, guna mendesaknya membangun bom atom.)

Pada tahun yang sama, Nazi, sadar bahwa pelepasan energi dahsyat dari atom uranium bisa memberi mereka senjata tak terkalahkan, memerintahkan mahasiswa Bohr, Heisenberg, untuk menciptakan bom atom bagi Hitler. Semalaman, pembahasan terkait probabilitas fisi quantum menjadi amat serius, dengan mempertaruhkan nasib sejarah manusia. Pembahasan probabilitas penemuan kucing hidup segera tergantikan oleh pembahasan probabilitas pemfisian uranium.

Pada 1941, sementara Nazi menyerbu sebagian besar Eropa, Heisenberg mengadakan perjalanan rahasia untuk bertemu mentor lamanya, Bohr, di Kopenhagen. Sifat persis pertemuan itu masih diselubungi misteri, dan sandiwara-sandiwara peraih penghargaan mengenai itu telah dikarang, dengan sejarawan yang masih memperdebatkan isinya. Apakah Heisenberg menawarkan untuk menyabotase bom atom Nazi? Ataukah Heisenberg mencoba merekrut Bohr untuk pembuatan bom Nazi? Enam dekade kemudian, pada 2002, banyak dari misteri terkait maksud kedatangan Heisenberg tersebut akhirnya terangkat, ketika keluarga Bohr merilis sebuah surat yang ditulis Bohr kepada Heisenberg pada 1950-an tapi tak pernah dikirimkan. Dalam surat tersebut, Bohr mengenang ketika Heisenberg mengatakan dalam pertemuan itu bahwa kemenangan Nazi tidak dapat dielakkan. Karena tidak ada yang menghentikan kekuatan dahsyat Nazi, adalah logis semata bila Bohr bekerja untuk Nazi.

Bohr gempar, terguncang setengah mati. Sambil gemetar, dia menolak mengizinkan penelitiannya tentang teori quantum jatuh ke tangan Nazi. Karena Denmark berada di bawah kekuasaan Nazi, Bohr menyusun pelarian rahasia dengan pesawat, dan dia hampir mati lemas akibat kurangnya oksigen dalam perjalanan pesawat menuju kebebasan itu.

Dalam pada itu, di Universitas Columbia, Enrico Fermi menunjukkan bahwa reaksi nuklir berantai bisa dikerjakan. Setelah sampai pada kesimpulan ini, dia memandang tajam ke New York City dan menyadari bahwa satu bom bisa menghancurkan segala sesuatu yang

dia lihat dari kaki langit kota terkenal itu. Wheeler, menyadari sedemikian tinggi pertaruhan itu, dengan sukarela meninggalkan Princeton dan bergabung dengan Fermi di lantai bawah tanah Stagg Field di Universitas Chicago, di mana mereka bersama-sama membangun reaktor nuklir pertama, yang secara resmi membuka zaman nuklir.

Pada dekade berikutnya, Wheeler menyaksikan beberapa dari perkembangan terpenting dalam peperangan atom. Selama perang, dia membantu mengawasi pembangunan Hanford Reservation raksasa di Negara Bagian Washington, yang memproduksi plutonium mentah yang diperlukan untuk membangun bom yang di kemudian hari meluluh-lantakkan Nagasaki. Beberapa tahun kemudian, dia mengerjakan bom hidrogen, menyaksikan ledakan bom hidrogen pertama pada 1952 dan kehancuran yang ditimbulkan ketika sebuah kepingan Matahari terlepas ke atas sebuah pulau kecil di Samudera Pasifik. Tapi setelah berada di garis depan sejarah keduniaan selama lebih dari satu dekade, dia akhirnya kembali ke cinta pertamanya, misteri-misteri teori quantum.

Sum Over Path

Salah seorang komplotan mahasiswa Wheeler setelah perang adalah Richard Feynman, yang menemukan cara yang barangkali paling sederhana namun paling mendalam untuk meringkas kerumitan-kerumitan teori quantum. (Konsekuensi dari idenya membuat Feynman memenangkan Hadiah Nobel pada 1965.) Katakanlah Anda

ingin berjalan melintasi ruangan. Menurut Newton, Anda cukup mengambil jalur terpendek, dari titik A ke titik B, disebut jalur klasik. Tapi menurut Feynman, Anda pertama-tama harus mempertimbangkan semua jalur potensial yang menghubungkan titik A dan B. Ini artinya mempertimbangkan jalur yang membawa Anda menuju Mars, Yupiter, bintang terdekat, bahkan jalur yang menuju ke masa lalu, kembali ke *big bang*. Tak peduli seberapa gila dan aneh jalurnya, Anda harus mempertimbangkan mereka. Lalu Feynman menunjuk nomor untuk tiap jalur, memberikan seperangkat aturan tepat untuk mengkalkulasi nomor ini. Ajaibnya, dengan menambahkan nomor-nomor ini dari semua jalur potensial, Anda menemukan probabilitas perjalanan dari titik A ke titik B berdasarkan mekanika quantum standar. Ini sungguh luar biasa.

Feynman menemukan bahwa jumlah nomor jalur-jalur yang ganjil dan melanggar hukum gerak Newton ini selalu seimbang hingga memberikan [jumlah] total kecil. Ini merupakan sumber fluktuasi-fluktuasi quantum—yakni, mereka mewakili jalur yang jumlahnya kecil. Tapi dia juga menemukan bahwa jalur masuk akal Newton adalah jalur yang tidak seimbang dan karenanya mempunyai [jumlah] total terbesar; ini adalah jalur dengan probabilitas tertinggi. Dengan demikian, gerak masuk akal alam semesta fisik kita merupakan kondisi paling probabel di antara kondisi-kondisi yang tak terhingga jumlahnya. Tapi kita koeksis dengan semua kemungkinan kondisi, yang beberapanya membawa kita ke era dinosaurus, ke supernova terdekat, dan ke tepi alam semesta. (Jalur-jalur aneh ini menghasilkan

penyimpangan kecil dari jalur masuk akal Newton tapi untungnya mempunyai probabilitas amat rendah.)

Dengan kata lain, seaneh apapun itu, setiap kali Anda berjalan melintasi ruangan, entah bagaimana, tubuh Anda "mendengus" semua jalur potensial terlebih dahulu, bahkan jalur yang membentang ke quasar jauh dan *big bang*, dan kemudian menambahkannya. Menggunakan matematika hebat yang disebut *functional integral*, Feynman memperlihatkan bahwa jalur Newton adalah jalur paling probabel, bukan satu-satunya jalur. Dalam *tour de force* matematis (proses matematika luar biasa—penj), Feynman sanggup membuktikan bahwa gambaran ini, betapapun mengherankannya ia, persis ekuivalen dengan mekanika quantum biasa. (Nyatanya, Feynman mampu memberikan derivasi persamaan gelombang Schrödinger menggunakan pendekatan ini.)

Kemampuan "*sum over path*" (penjumlahan jalur)-nya Feynman adalah bahwa hari ini, ketika kita merumuskan teori GUT, inflasi, bahkan teori string, kita menggunakan sudut pandang "*path integral*"-nya Feynman. Metode ini sekarang diajarkan di setiap universitas di dunia dan sejauh ini merupakan cara paling hebat dan cocok dalam merumuskan teori quantum.

(Saya setiap hari menggunakan pendekatan *path integral* Feynman dalam penelitian saya. Setiap persamaan yang saya tulis ditulis dari sudut *sum over path* ini. Ketika pertama kali saya mempelajari sudut pandang Feynman sebagai mahasiswa sarjana, itu mengubah seluruh gambaran mental saya mengenai alam semesta. Secara intelektual,

saya memahami matematika abstrak teori quantum dan relativitas umum, tapi ide Feynman-lah—bahwa saya sedikit-banyak sedang mendengus jalur yang membawa saya ke Mars atau bintang-bintang jauh selagi saya berjalan melintasi ruangan—yang mengubah pandangan keduniaan saya. Mendadak, saya mendapat gambaran mental yang baru dan aneh mengenai diri saya yang hidup di sebuah dunia quantum. Saya mulai menyadari bahwa teori quantum jauh lebih asing dari konsekuensi aneh relativitas.)

Ketika Feynman mengembangkan rumusan aneh ini, Wheeler, yang bekerja di Universitas Princeton, tergesa-gesa menuju Institute for Advanced Study untuk menemui Einstein guna meyakinkannya tentang keeleganan dan kekuatan gambaran baru ini. Wheeler dengan penuh gairah menjelaskan teori baru *path integral*-nya Feynman kepada Einstein. Wheeler sama sekali tidak menyadari betapa gilanya ini kedengarannya bagi Einstein. Sesudah itu, Einstein menggelengkan kepalanya dan mengulangi bahwa dirinya tetap tidak percaya bahwa Tuhan bertaruh dengan dunia. Einstein mengaku kepada Wheeler bahwa dirinya boleh jadi salah, tapi dia juga bersikeras bahwa dirinya mempunyai hak untuk salah.

Temannya Wigner

Sebagian besar fisikawan mengangkat bahu dan angkat tangan ketika dihadapkan dengan paradoks-paradoks aneh mekanika quantum. Bagi kebanyakan ilmuwan, mekanika quantum adalah seperangkat aturan yang menghasilkan probabilitas benar dengan akurasi luar biasa.

Sebagaimana dikatakan oleh fisikawan yang menjadi pendeta, John Polkinghorne, "Mekanika quantum biasa tidak lebih filosofis dari mekanika motor biasa."

Bagaimanapun, beberapa pemikir serius fisika telah bergulat dengan pertanyaan-pertanyaan ini. Contohnya, terdapat beberapa jalan untuk memecahkan persoalan kucing Schrödinger. Pertama, yang disokong oleh peraih Nobel, Eugene Wigner, dan lainnya, adalah bahwa *kesadaran menentukan eksistensi*. Wigner menulis bahwa "tidak mungkin merumuskan hukum mekanika quantum dengan cara yang konsisten sepenuhnya, tanpa merujuk pada kesadaran [pengamat]...studi dunia eksternal yang membawa pada kesimpulan bahwa kandungan kesadaran adalah realitas pokok." Atau, sebagaimana suatu kali ditulis oleh penyair John Keats, "Tidak ada yang nyata sampai itu dialami."

Tapi jika saya melakukan pengamatan, siapa/apa yang akan menetapkan dalam kondisi mana saya berada? Artinya seorang lain harus mengamati saya untuk mengkolapskan fungsi gelombang saya. Ini terkadang disebut sebagai "temannya Wigner". Tapi ini juga berarti bahwa seseorang harus mengamati temannya Wigner, dan temannya temannya Wigner, dan seterusnya. Apakah terdapat suatu kesadaran kosmik yang menentukan seluruh rentetan teman ini dengan mengamati seluruh alam semesta?

Fisikawan yang ngotot meyakini peran sentral kesadaran adalah Andrei Linde, salah seorang pendiri teori *inflationary universe*.

Bagi saya sebagai seorang manusia, tak terpikir untuk

> mengklaim bahwa alam semesta ada tanpa pengamat. Kita adalah bersama-sama, alam semesta dan kita. Tatkala Anda berkata bahwa alam semesta eksis tanpa pengamat, saya tidak bisa mencernanya. Saya tidak bisa membayangkan sebuah *theory of everything* konsisten yang mengabaikan kesadaran. Suatu perangkat perekam tidak dapat memainkan peran seorang pengamat, sebab siapa yang akan membaca apa yang tertulis di perangkat perekam ini. Agar kita bisa melihat bahwa sesuatu terjadi, dan saling mengatakan kepada yang lain bahwa sesuatu terjadi, Anda harus memiliki alam semesta, Anda harus memiliki perangkat perekam, dan Anda harus memiliki kita...Tanpa adanya pengamat, alam semesta kita mati.

Menurut filosofi Linde, fosil-fosil dinosaurus tidak betul-betul eksis sampai Anda melihatnya. Tapi ketika Anda melihatnya, mereka menjadi eksis seolah-olah mereka eksis jutaan tahun silam. (Fisikawan yang memegang sudut pandang ini berhati-hati menguraikan bahwa gambaran ini konsisten secara eksperimen dengan dunia di mana fosil-fosil dinosaurus betul-betul ada jutaan tahun silam.)

(Beberapa orang, yang tidak suka memperkenalkan kesadaran ke dalam fisika, mengklaim bahwa sebuah kamera bisa melakukan pengamatan terhadap elektron, sehingga fungsi gelombang kolaps tanpa memerlukan entitas sadar. Tapi, kalau begitu, siapa yang akan mengatakan bahwa kamera itu eksis? Sebuah kamera lain dibutuhkan untuk "mengamati" kamera pertama dan mengkolapskan fungsi gelombangnya. Kalau begitu kamera kedua dibutuhkan untuk

mengamati kamera pertama, dan kamera ketiga dibutuhkan untuk mengamati kamera kedua, dan seterusnya. Jadi pengenalan kamera tidak menjawab pertanyaan tentang bagaimana fungsi gelombang kolaps.)

Dekoherensi

Cara untuk memecahkan beberapa pertanyaan filosofis menjengkelkan ini, yang memperoleh popularitas di kalangan fisikawan, disebut dekoherensi. Ini pertama kali dirumuskan oleh fisikawan Jerman, Dieter Zeh, pada 1970. Dia melihat bahwa di dunia riil, Anda tidak mungkin memisahkan kucing dari lingkungannya. Kucing berkontak secara konstan dengan molekul-molekul udara, kotak, dan bahkan sinar kosmik yang menembus eksperimen tersebut. Interaksi ini, tak peduli seberapa pun kecil, mempengaruhi fungsi gelombang secara radikal: jika fungsi gelombang terganggu sedikit banyak, maka fungsi gelombang mendadak pecah menjadi dua fungsi gelombang kucing mati atau kucing hidup yang berlainan, yang tak lagi berinteraksi. Zeh menunjukkan bahwa tubrukan dengan satu molekul udara sudah cukup untuk mengkolapskannya, mendorong pemisahan permanen fungsi gelombang kucing mati dan kucing hidup, yang tidak bisa lagi saling berkomunikasi. Dengan kata lain, sebelum Anda membuka kotak pun, kucing telah berkontak dengan molekul-molekul udara dan karenanya sudah mati atau masih hidup.

Zeh melakukan observasi kunci yang terlupakan: supaya kucing berada dalam kondisi mati dan hidup, fungsi gelombang kucing mati

dan fungsi gelombang kucing hidup harus bervibrasi dalam kesinkronan yang hampir tepat, sebuah kondisi yang disebut koherensi. Tapi secara eksperimen, ini hampir mustahil. Membuat objek-objek koheren bervibrasi secara berbarengan di laboratorium adalah sesuatu yang luar biasa sulit. (Pada prakteknya, sulit untuk membuat lebih dari segenggam atom bervibrasi secara koheren sebab terdapat interferensi dari dunia luar.) Di dunia riil, objek-objek berinteraksi dengan lingkungan, dan interaksi kecil dengan dunia luar bisa mengganggu dua fungsi gelombang, dan kemudian mereka mulai "berdekoherensi"—yakni, rontok dari kesinkronan dan berpisah. Sekali kedua fungsi gelombang tidak lagi saling bervibrasi secara sefase, Zeh menunjukkan, dua fungsi gelombang itu tak lagi berinteraksi dengan satu sama lain.

Many Worlds

Awalnya, dekoherensi terdengar memuaskan, karena fungsi gelombang kini kolaps bukan lewat kesadaran tapi lewat interaksi acak dengan dunia luar. Tapi ini masih belum memecahkan pertanyaan fundamental yang menggelisahkan Einstein: bagaimana alam "memilih" ke kondisi mana ia kolaps? Ketika sebuah molekul udara mengenai kucing, siapa atau apa yang menentukan kondisi akhir kucing? Terhadap pertanyaan ini, teori dekoherensi hanya menyatakan bahwa dua fungsi gelombang berpisah dan tak lagi berinteraksi, tapi tidak menjawab pertanyaan awal: apakah kucing itu hidup atau mati? Dengan kata lain, dekoherensi menjadikan

kesadaran tak dibutuhkan dalam mekanika quantum, tapi ia tidak memecahkan pertanyaan kunci yang mengganggu Einstein: bagaimana alam "memilih" kondisi akhir kucing? Terhadap pertanyaan ini, teori dekoherensi membisu.

Namun, hari ini terdapat ekstensi alami dekoherensi yang memecahkan pertanyaan ini dan mendapat pengakuan luas di kalangan fisikawan. Pendekatan kedua ini dipelopori oleh mahasiswa Wheeler yang lain, Hugh Everett III, yang membahas kemungkinan bahwa kucing bisa mati dan hidup pada waktu yang sama tapi di dua alam semesta berbeda. Ketika diselesaikan pada 1957, tesis Ph.D. Everett hampir tidak diperhatikan. Namun, setelah bertahun-tahun, perhatian terhadap interpretasi "*many worlds*" (banyak dunia) mulai tumbuh. Sekarang, ini telah melepaskan gelombang pasang berupa perhatian terbarukan terhadap paradoks-paradoks teori quantum.

Dalam interpretasi yang sama sekali baru ini, si kucing berada dalam kondisi mati dan hidup karena alam semesta telah membelah menjadi dua. Di satu alam semesta, kucing itu mati; di alam semesta lain, kucing itu masih hidup. Kenyataannya, di setiap titik waktu quantum, alam semesta membelah setengah, dalam sebuah rentetan pembelahan alam semesta tanpa henti. Semua alam semesta adalah mungkin menurut skenario ini, semuanya sama-sama riil. Orang-orang yang hidup di setiap alam semesta mungkin menyatakan dengan semangat bahwa alam semesta *mereka*-lah yang riil, dan bahwa yang lainnya adalah imajiner atau palsu. Alam semesta-alam semesta paralel ini bukan dunia mati dengan eksistensi yang sebentar;

di setiap alam semesta, kita mendapatkan bentuk objek-objek padat dan peristiwa konkret yang sama riil dan objektifnya dengan yang lain.

Keunggulan interpretasi ini adalah bahwa kita bisa mencoret syarat nomor tiga, kekolapsan fungsi gelombang. Fungsi gelombang tidak pernah kolaps, dalam sebuah pohon tanpa akhir, di mana setiap dahan mewakili satu alam semesta. Keunggulan hebat teori *many worlds* adalah bahwa ia lebih sederhana dari interpretasi Kopenhagen: ia tidak membutuhkan kekolapsan fungsi gelombang. Harga yang kita bayar adalah bahwa sekarang kita mempunyai alam semesta-alam semesta yang terus-menerus membelah menjadi jutaan dahan. (Beberapa orang merasa kesulitan memahami bagaimana caranya mengawasi semua alam semesta yang berkembang-biak ini. Namun, persamaan gelombang Schrödinger melakukan ini dengan sendirinya. Cukup dengan menelusuri evolusi persamaan gelombang tersebut, seseorang dapat segera menemukan semua dahan.)

Jika interpretasi ini benar, maka pada saat ini juga tubuh Anda berkoeksis dengan fungsi gelombang dinosaurus-dinosaurus yang terlibat dalam pertempuran maut. Yang berkoeksis di ruangan Anda adalah fungsi gelombang sebuah dunia di mana Jerman memenangkan Perang Dunia II, di mana alien-alian dari angkasa luar berkeliaran, di mana Anda tidak pernah dilahirkan. Dunia-dunia dalam *The Man in the High Castle* dan *The Twilight Zone* adalah termasuk alam semesta yang eksis di ruang tinggal Anda. Sulitnya, kita tidak bisa lagi berinteraksi dengan mereka, karena mereka telah

berdekoherensi dari kita.

Sebagaimana kata Alan Guth, "Terdapat alam semesta di mana Elvis masih hidup." Fisikawan Frank Wilczek menulis, "Kita dihantui oleh kesadaran bahwa salinan tak terhingga diri kita yang sedikit berbeda sedang menjalani kehidupan paralel mereka dan bahwa setiap saat semakin banyak duplikat yang eksis dan mengambil banyak pilihan masa depan kita." Dia mencatat bahwa sejarah peradaban Yunani, dan karenanya dunia Barat, mungkin akan berbeda seandainya Helen dari Troy tidak semempesona itu, seandainya dia memiliki kutil jelek di hidungnya. "*Well,* kutil bisa timbul dari mutasi pada sel-sel tunggal, seringkali dipicu oleh paparan sinar ultraviolet matahari." Dia melanjutkan, "Kesimpulan: ada banyak dunia di mana Helen dari Troy *memang* mempunyai kutil di ujung hidungnya."

Saya teringat pada perkataan dalam karya sains fiksi klasik karangan Olaf Stapledon, *Star Maker*: "Kapan pun seorang makhluk dihadapkan dengan beberapa kemungkinan tindakan, dia mengambil semuanya, sehingga menciptakan banyak...sejarah kosmos yang berlainan. Karena dalam setiap rentetan evolusi kosmos terdapat banyak makhluk dan masing-masingnya terus-menerus dihadapkan dengan banyak kemungkinan arah, dan kombinasi semua arah mereka adalah tak terhitung, alam semesta-alam semesta berlainan dalam jumlah tak terhingga mengelupas dari setiap momen rentetan waktu."

Pikiran terasa terguncang ketika kita menyadari bahwa, menurut interpretasi mekanika quantum ini, semua kemungkinan dunia

berkoeksis dengan kita. Walaupun *wormhole* dibutuhkan untuk menjangkau dunia-dunia lain semacam itu, realitas-realitas quantum ini eksis di ruangan yang sama dengan yang kita tinggali. Mereka berkoeksis dengan kita ke manapun kita pergi. Pertanyaan kuncinya adalah: jika ini benar, mengapa kita tidak melihat alam semesta-alam semesta lain yang mengisi ruang tinggal kita ini? Di sinilah dekoherensi masuk: fungsi gelombang kita berdekoherensi dengan dunia-dunia lain ini (yakni, gelombang-gelombang tak lagi saling sefase). Kita tak lagi berkontak dengan mereka. Artinya kontaminasi kecil dengan lingkungan akan mencegah berbagai fungsi gelombang berinteraksi satu sama lain. (Di bab 2, saya menyebutkan kemungkinan pengecualian terhadap batasan ini, di mana makhluk-makhluk berakal mungkin mampu bepergian di antara realitas-realitas quantum.)

Apakah ini kedengaran aneh? Peraih Nobel, Steven Weinberg, menyamakan teori *multiple universe* ini dengan radio. Di sekeliling Anda, terdapat ratusan gelombang radio berbeda yang dipancarkan dari stasiun-stasiun jauh. Pada momen tertentu, kantor, atau mobil, atau ruang tinggal Anda penuh dengan gelombang radio ini. Namun, jika Anda menyalakan radio, Anda hanya dapat mendengarkan satu frekuensi pada satu waktu; frekuensi-frekuensi lain telah berdekoherensi dan tidak lagi sefase dengan satu sama lain. Setiap stasiun mempunyai energi berbeda, frekuensi berbeda. Alhasil, radio Anda hanya dapat disetel ke satu siaran pada satu waktu.

Demikian pula, di alam semesta kita, kita "diperdengarkan"

frekuensi yang bersesuaian dengan realitas fisik. Tapi terdapat realitas paralel dalam jumlah tak terhingga yang berkoeksis dengan kita di ruangan yang sama, walaupun kita tidak dapat "mendengarkan" mereka. Walaupun dunia-dunia ini sangat mirip, masing-masing mempunyai energi berbeda. Dan karena masing-masing dunia terdiri dari triliunan atom, artinya selisih energi bisa sungguh besar. Karena frekuensi gelombang-gelombang ini proporsional dengan energinya (berdasarkan hukum Planck), artinya gelombang masing-masing dunia bervibrasi pada frekuensi berbeda dan tidak bisa berinteraksi lagi. Praktisnya, gelombang berbagai dunia ini tidak saling berinteraksi atau mempengaruhi.

Yang mengejutkan, para ilmuwan, dengan mengadopsi sudut pandang aneh ini, bisa memperoleh semua hasil pendekatan Kopenhagen tanpa harus mengkolapskan fungsi gelombang. Dengan kata lain, eksperimen-eksperimen yang dilakukan dengan interpretasi Kopenhagen, atau interpretasi *many worlds*, akan memberikan hasil eksperimen yang sama persis. Kekolapsan fungsi gelombang ala Bohr adalah ekuivalen secara matematis dengan kontaminasi lingkungan. Dengan kata lain, kucing Schrödinger bisa mati dan hidup pada waktu yang sama jika kita dapat, dengan suatu cara, mengisolasi kucing dari kontaminasi potensial dari setiap atom atau sinar kosmik. Tentu saja, ini hampir mustahil. Sekali kucing berkontak dengan sinar kosmik, fungsi gelombang kucing mati dan kucing hidup berdekoherensi, dan fungsi gelombang seolah-olah terlihat kolaps.

It from Bit

Dengan semua perhatian terbarukan terhadap persoalan pengukuran dalam teori quantum, Wheeler telah menjadi bapak tua agung fisika quantum, tampil di banyak konferensi penghormatan dirinya. Dia bahkan telah dipanggil sebagai semacam guru oleh para penyokong New Age yang terpesona oleh pertanyaan tentang kesadaran dalam ilmu fisika. (Namun, dia tidak selalu senang dengan pengaitan seperti itu. Suatu kali, dia sengsara mendapati dirinya berada satu program dengan tiga orang parapsikolog. Dia cepat-cepat mengeluarkan pernyataan yang mencakup kalimat "Di mana ada asap, di situ ada rokok.")

Setelah 70 tahun merenungkan paradoks-paradoks teori quantum, Wheeler menjadi orang pertama yang mengakui bahwa dirinya tidak punya jawaban. Dia selalu terus mempertanyakan asumsinya. Ketika ditanya tentang persoalan pengukuran dalam mekanika quantum, dia bilang, "Saya sungguh dibuat gila oleh pertanyaan tersebut. Saya akui terkadang saya 100% serius mengambil ide bahwa dunia adalah kilasan khayalan dan, di saat yang lain, bahwa dunia betul-betul eksis di luar sana tanpa tergantung kepada kita. Namun, saya sepenuh hati menganut kata-kata Leibniz, 'Dunia ini mungkin adalah ilusi dan eksistensi mungkin hanyalah mimpi, tapi mimpi atau ilusi ini bagi saya cukup nyata berhubung kita tak pernah ditipu olehnya.'"

Hari ini, teori *many worlds*/dekoherensi mendapat popularitas di kalangan fisikawan. Tapi Wheeler gelisah sebab teori ini memerlukan "terlalu banyak bagasi". Dia bermain-main dengan penjelasan

persoalan kucing Schrödinger yang lain lagi. Dia menyebut teorinya "*It from bit*". Ini merupakan teori non-ortodoks, yang memulai dengan asumsi bahwa informasi adalah akar semua eksistensi. Ketika kita menatap bulan, galaksi, atau atom, esensi mereka, klaimnya, ada pada informasi yang tersimpan di dalamnya. Tapi informasi ini menjadi eksis saat alam semesta mengamati dirinya sendiri. Dia menggambar sebuah diagram sirkuler, merepresentasikan sejarah alam semesta. Di permulaan alam semesta, ia menjadi ada karena diamati. Artinya "*it*" (materi di alam semesta) menjadi eksis ketika informasi ("*bit*") alam semesta diamati. Dia menyebut ini sebagai "*participatory universe*" (alam semesta partisipan—penj)—yaitu bahwa alam semesta beradaptasi dengan kita sebagaimana halnya kita beradaptasi dengan alam semesta, bahwa kehadiran kita memungkinkan eksistensi alam semesta. (Karena tidak ada konsensus universal mengenai persoalan pengukuran dalam mekanika quantum, sebagian besar fisikawan mengambil sikap *wait-and-see* terhadap [teori] *It from Bit*.

Komputasi dan Teleportasi Quantum

Pembahasan filosofis semacam itu mungkin terasa tak berguna, tanpa penerapan praktis di dunia kita. Bukannya memperdebatkan berapa banyak malaikat yang bisa berdansa di ujung kepala sebuah peniti, fisikawan quantum kelihatannya memperdebatkan di berapa banyak tempat sebuah elektron bisa berada pada waktu yang sama.

Namun, ini bukanlah renungan senggang para akademisi pengasing diri. Suatu hari nanti ini dapat memiliki penerapan paling praktis

dibanding semuanya: mendorong perekonomian dunia. Suatu hari, kekayaan seluruh bangsa dapat tergantung pada kepelikan kucing Schrödinger. Pada saat itu, komputer kita barangkali akan mengkomputasi di alam semesta-alam semesta paralel. Hampir semua infrastruktur komputer kita hari ini didasarkan pada transistor silikon. Hukum Moore, yang menyatakan bahwa kemampuan komputer berlipat-ganda setiap 18 bulan, bisa menjadi kenyataan berkat kemampuan kita menanam transistor yang semakin kecil ke dalam chip silikon melalui penyorotan radiasi ultraviolet. Walaupun hukum Moore telah merevolusi gambaran teknologi, ia tidak bisa berlanjut selamanya. Chip Pentium tercanggih mempunyai *layer* dengan 20 atom dari sisi ke sisi. Dalam 15 sampai 20 tahun ke depan, para ilmuwan dapat mengkalkulasikan *layer* dengan, barangkali, 5 atom. Pada jarak yang luar biasa kecil ini, kita harus meninggalkan mekanika Newton dan mengadopsi mekanika quantum, di mana prinsip ketidakpastian Heisenberg mengambil alih. Konsekuensinya, kita tak lagi mengetahui persis di mana elektron berada. Artinya arus pendek akan terjadi ketika elektron mengeluyur keluar insulator dan semikonduktor, bukan tetap tinggal di dalamnya.

Di masa depan, kita akan menjangkau batas penanaman wafer silikon. Zaman Silikon akan segera berlalu. Barangkali itu akan mengantarkan era quantum. Silicon Valley mungkin menjadi Rust Belt. Suatu hari nanti kita mungkin terpaksa mengkomputasi di atom-atom itu sendiri, memperkenalkan arsitektur baru untuk komputasi. Hari ini komputer berbasiskan sistem biner—setiap bilangan didasarkan

pada nol dan satu. Sedangkan, pusingan atom dapat mengarah ke atas, ke bawah, atau ke samping secara serempak. Bit komputer (0 dan 1) bisa digantikan oleh "qubit" (antara 0 dan 1), menjadikan komputasi quantum jauh lebih canggih daripada komputer biasa.

Komputer quantum, contohnya, bisa mengguncangkan fondasi keamanan internasional. Hari ini, bank-bank besar, perusahaan multinasional, dan negara industri menyandi rahasia mereka dengan algoritma komputer yang rumit. Banyak kode rahasia didasarkan pada pemfaktoran bilangan besar. Perlu berabad-abad, contohnya, bagi komputer biasa untuk memfaktorkan sebuah bilangan berisi ratusan digit. Tapi bagi komputer quantum, kalkulasi semacam itu mungkin mudah dilakukan; mereka bisa memecah kode rahasia negara-negara di dunia.

Untuk memahami bagaimana sebuah komputer quantum bekerja, ambil misal kita mensejajarkan sederetan atom, di mana pusingan mereka mengarah ke satu arah di medan magnet. Kemudian kita menyorotkan sinar laser kepada mereka, sehingga banyak dari pusingan itu yang berbalik selagi sinar laser memantul dari atom. Dengan mengukur pantulan cahaya laser tersebut, kita merekam operasi matematis rumit, perpencaran cahaya dari atom. Jika kita mengkalkulasi proses ini menggunakan teori quantum, mengikuti Feynman, kita harus menambahkan semua posisi potensial atom-atom, yang berpusing ke semua kemungkinan arah. Kalkulasi quantum yang sederhana sekalipun, yang memerlukan waktu sepecahan detik, hampir mustahil untuk dijalankan di komputer

standar, tak peduli berapa banyak waktu yang diberikan.

Pada prinsipnya, sebagaimana ditekankan oleh David Deutch dari Oxford, ini mengandung arti bahwa manakala kita memakai komputer quantum, kita harus menjumlahkan semua alam semesta paralel yang mungkin eksis. Walaupun kita tidak bisa mengadakan kontak langsung dengan alam semesta-alam semesta lain ini, sebuah komputer atom bisa mengkalkulasi mereka memanfaatkan kondisi pusingan yang eksis di alam semesta paralel. (Sementara kita tak lagi koheren dengan alam semesta lain di ruang tinggal kita, atom-atom dalam sebuah komputer quantum, berdasarkan tafsiran, bervibrasi koheren secara berbarengan.)

Walaupun kemampuan komputer quantum sungguh mengejutkan, prakteknya persoalan yang ada sama besarnya. Saat ini, rekor dunia untuk jumlah atom yang digunakan dalam komputer quantum adalah tujuh. Paling banter, kita bisa mengalikan 3 dengan 5, untuk mendapatkan 15 atom pada komputer quantum, hampir tidak mengesankan. Agar sebuah komputer quantum bisa kompetitif dengan laptop biasa, kita membutuhkan ratusan, barangkali jutaan, atom yang bervibrasi koheren. Karena tubrukan dengan satu molekul udara bisa membuat atom-atom berdekoherensi, seseorang harus mempunyai keadaan yang luar biasa bersih untuk mengisolasi atom ujicoba dari lingkungan. (Untuk membangun komputer quantum yang bisa melampaui kecepatan komputer modern, diperlukan ribuan sampai jutaan atom, jadi komputasi quantum masih jauh berdekade-dekade.)

Teleportasi Quantum

Mungkin pada akhirnya ada penerapan praktis lain pada pembahasan fisikawan yang tak berujung tentang alam semesta quantum paralel: teleportasi quantum. "*Transporter*" yang digunakan dalam *Star Trek* dan program sains fiksi lainnya untuk mengangkut orang-orang dan peralatan di ruang angkasa terlihat seperti sebuah cara menakjubkan untuk menempuh jarak yang jauh. Tapi betapapun menggiurkannya itu, ide teleportasi telah membingungkan fisikawan karena melanggar prinsip ketidakpastian. Dengan melakukan pengukuran pada sebuah atom, Anda mengganggu status atom, dan karenanya sebuah salinan persis tidak bisa dihasilkan.

Tapi ilmuwan menemukan celah dalam argumen ini pada 1993, lewat sesuatu yang disebut *quantum entanglement* (jeratan quantum). Ini didasarkan pada sebuah eksperimen lama yang diajukan pada 1935 oleh Einstein dan koleganya, Boris Podolsky dan Nathan Rosen, (yang disebut paradoks EPR) untuk menunjukkan betapa gilanya teori quantum itu sebenarnya. Katakanlah terdapat sebuah ledakan, dan dua elektron terbang memisah ke arah berlawanan, bergerak hampir pada kecepatan cahaya. Karena elektron bisa berpusing seperti gasing, asumsikan pusingan mereka berkorelasi—yakni, bila elektron satu mempunyai poros pusingan yang mengarah ke atas, elektron lain berpusing ke bawah (sehingga pusingan total adalah nol). Bagaimanapun, sebelum kita menjalankan pengukuran, kita tidak tahu ke arah mana masing-masing elektron berpusing.

Nah tunggu beberapa tahun. Pada saat itu, kedua elektron terpisah

bertahun-tahun-cahaya. Jika kita lalu melakukan pengukuran terhadap pusingan salah satu elektron dan mendapati bahwa poros pusingannya mengarah ke atas, maka kita dengan serta-merta mengetahui bahwa elektron lain berpusing ke bawah (dan sebaliknya). Kenyataannya, fakta bahwa elektron ditemukan berpusing ke atas memaksa elektron lain berpusing ke bawah. Artinya kita kini, dengan serta-merta, tahu sesuatu tentang sebuah elektron yang jauhnya bertahun-tahun-cahaya. (Informasi, kelihatannya, bergerak lebih cepat dari kecepatan cahaya, sebuah pelanggaran nyata terhadap relativitas khusus Einstein.) Dengan argumentasi tajam, Einstein bisa menunjukkan bahwa, dengan melakukan pengukuran berturut-turut terhadap satu pasangan, seseorang dapat melanggar prinsip ketidakpastian. Yang lebih penting, dia menunjukkan bahwa mekanika quantum lebih ganjil dari yang sebelumnya dipikirkan setiap orang.

Sampai waktu itu, fisikawan percaya bahwa alam semesta adalah lokal/setempat, bahwa disturbansi di satu bagian alam semesta hanya menyebar secara lokal dari sumbernya. Einstein menunjukkan bahwa mekanika quantum pada esensinya bersifat *nonlokal*—disturbansi dari satu sumber bisa serta-merta mempengaruhi bagian-bagian jauh alam semesta. Einstein menyebutnya "tindakan menyeramkan di kejauhan", yang menurutnya absurd. Dengan demikian, pikir Einstein, teori quantum pasti salah.

(Para kritikus mekanika quantum mungkin memecahkan paradoks Einstein-Podolsky-Rosen dengan berasumsi bahwa, seandainya instrumen kita cukup sensitif, mereka bisa betul-betul menetapkan ke arah

mana elektron-elektron berpusing. Ketidakpastian nyata pada pusingan dan posisi sebuah elektron adalah fiksi, lantaran fakta bahwa instrumen kita terlalu mentah. Mereka memperkenalkan konsep yang disebut *hidden variable* (variabel tersembunyi)—yakni, pasti ada sebuah teori *sub*quantum tersembunyi, di mana terdapat ketidakpastian sama sekali, didasarkan pada variabel-variabel baru yang disebut *hidden variable.*)

Pertaruhan yang dikemukakan sangat besar pada tahun 1964, ketika fisikawan John Bell menguji paradoks EPR dan variabel tersembunyi. Dia memperlihatkan bahwa jika seseorang melakukan eksperimen EPR, semestinya terdapat korelasi numeris antara pusingan kedua elektron, tergantung pada teori mana yang digunakannya. Jika teori variabel tersembunyi benar, sebagaimana yang diyakini para skeptis, maka pusingan kedua elektron semestinya berkorelasi dengan suatu cara. Jika mekanika quantum benar, putaran semestinya berkorelasi dengan suatu cara lain. Dengan kata lain, mekanika quantum (fondasi seluruh fisika atom modern) akan naik atau runtuh atas dasar satu eksperimen.

Tapi eksperimen-eksperimen telah secara meyakinkan membuktikan Einstein salah. Di awal 1980-an, Alan Aspect dan koleganya di Prancis melakukan eksperimen EPR dengan dua detektor yang terpisah sejauh 13 meter, yang mengukur pusingan foton yang dipancarkan dari atom-atom kalsium. Pada 1997, eksperimen EPR dijalankan dengan detektor-detektor yang terpisah 11 kilometer. Teori quantum selalu menang. Sebentuk pengetahuan tertentu *memang*

berjalan lebih cepat dari cahaya. (Walaupun Einstein salah dalam eksperimen EPR, dia benar dalam hal pertanyaan lebih besar tentang komunikasi melebihi kecepatan cahaya. Eksperimen EPR, walaupun memperkenankan Anda mengetahui sesuatu secara serta-merta mengenai sisi lain galaksi, tidak memperkenankan Anda mengirim pesan dengan cara ini. Anda tidak dapat, misalnya, mengirim kode Morse. Kenyataannya, "transmiter EPR" hanya akan mengirim sinyal acak, sebab pusingan yang Anda ukur adalah acak setiap kali Anda mengukurnya. Eksperimen EPR memperkenankan Anda memperoleh informasi mengenai sisi lain galaksi, tapi tidak memperkenankan Anda mentransmisikan informasi yang berguna—yakni, tidak acak.)

Bell senang menggambarkan efek tersebut menggunakan contoh dari seorang matematikawan bernama Bertelsman. Dia mempunyai kebiasaan sehari-hari yang aneh, mengenakan kaos kaki hijau di satu kaki dan kaos kaki biru di kaki lainnya, dengan urutan acak. Bila satu hari Anda melihat dia sedang mengenakan kaos kaki biru di kaki kirinya, maka Anda tahu, secara lebih cepat dari cahaya, bahwa kaos kaki di kaki lainnya adalah hijau. Tapi mengetahui hal itu tidaklah memperkenankan Anda mengkomunikasikan informasi dengan cara ini. Pengungkapan informasi berbeda dari pengiriman informasi. Eksperimen EPR tidak berarti bahwa kita bisa mengkomunikasikan informasi lewat telepati, perjalanan lebih cepat dari cahaya, atau perjalanan waktu. Tapi ia berarti bahwa adalah mustahil memisahkan diri kita sama sekali dari keutuhan alam semesta.

Ini memaksa kita mempunyai gambaran berbeda tentang alam

semesta kita. Terdapat "jeratan" kosmik di antara setiap atom tubuh kita dan atom-atom yang jauhnya bertahun-tahun-cahaya. Karena semua materi berasal dari ledakan tunggal, *big bang*, atom tubuh kita sedikit-banyak tertaut dengan beberapa atom di sisi lain alam semesta dalam semacam jaring quantum kosmik. Partikel-partikel yang terjerat adalah agak seperti saudara kembar yang masih tergabung oleh tali pusar (fungsi gelombangnya) yang bisa memiliki panjang bertahun-tahun-cahaya. Kejadian pada satu anggota secara otomatis mempengaruhi yang lainnya, dan karenanya pengetahuan menyangkut satu partikel bisa secara serta-merta mengungkap pengetahuan tentang pasangannya. Pasangan-pasangan yang terjerat bertindak seolah-olah mereka adalah objek tunggal, walaupun mereka bisa terpisah sangat jauh. (Lebih persisnya, karena fungsi gelombang partikel-partikel dalam *big bang* dahulunya terhubung dan koheren, fungsi gelombang mereka mungkin masih terhubung sebagian setelah miliaran tahun peristiwa *big bang*, sehingga disturbansi pada satu bagian fungsi gelombang dapat mempengaruhi bagian fungsi gelombang lain yang jauh.)

Pada 1993, para ilmuwan mengajukan penggunaan konsep jeratan EPR untuk menyediakan sebuah mekanisme teleportasi quantum. Pada 1997 dan 1998, para ilmuwan di Cal Tech, Universitas Aarhus (Denmark), dan Universitas Wales melakukan demonstrasi eksperimen teleportasi quantum pertama ketika satu foton diteleportasikan melintasi bagian atas meja. Samuel Braunstein dari Universitas Wales, yang merupakan anggota tim ini, menyamakan pasangan-pasangan

terjerat ini dengan sepasang kekasih "yang mengenal baik satu sama lain sehingga dapat menjawab pertanyaan untuk pecintanya sekalipun terpisah jarak sangat jauh."

(Eksperimen teleportasi quantum membutuhkan 3 objek, disebut A, B, dan C. Misalkan B dan C adalah dua saudara kembar yang terjerat. Walaupun B dan C bisa terpisah jarak amat jauh, mereka masih terjerat dengan satu sama lain. Sekarang misalkan B berhubungan dengan A, yaitu objek yang hendak diteleportasikan. B "memindai" A, sehingga informasi yang terkandung dalam A ditransfer ke B. Informasi ini lalu ditransfer secara otomatis ke si kembar C. Dengan demikian, C menjadi replika persis A.)

Perkembangan dalam teleportasi quantum melangkah cepat. Pada 2003, para ilmuwan di Universitas Genewa, Swiss, mampu menteleportasikan foton-foton sejauh 1,2 mil lewat kabel fiber optik. Foton cahaya (pada panjang gelombang 1,3 mm) di satu laboratorium diteleportasikan menjadi foton cahaya berpanjang gelombang berbeda (1,55 mm) di laboratorium lain yang terhubung oleh kabel panjang ini. Nicolas Gisin, fisikawan dalam proyek ini, mengatakan, "Mungkin, objek lebih besar seperti molekul akan bisa diteleportasikan sebelum saya sempat mati, tapi objek yang betul-betul besar tidak dapat diteleportasikan menggunakan teknologi yang sudah diramalkan sekarang."

Terobosan signifikan lain dibuat pada 2004, ketika ilmuwan di National Institute of Standards and Technology (NIST) tidak hanya menteleportasikan quantum cahaya tapi atom secara keseluruhan.

Mereka berhasil menjerat tiga atom beryllium dan mampu mentransfer karakteristik satu atom ke atom lainnya, sebuah pencapaian besar.

Penerapan praktis teleportasi quantum berpotensi sangat besar. Namun, seseorang pasti menunjukkan bahwa terdapat beberapa persoalan praktis pada teleportasi quantum. Pertama, objek asli hancur dalam proses ini, sehingga Anda tidak dapat membuat salinan-salinan objek yang sedang diteleportasikan. Hanya satu salinan yang mungkin. Kedua, Anda tidak dapat menteleportasikan sebuah objek secara lebih cepat dari cahaya. Relativitas masih berlaku, untuk teleportasi quantum sekalipun. (Untuk menteleportasikan objek A menjadi objek C, Anda masih memerlukan objek penengah B yang menghubungkan keduanya, yang berjalan lebih lambat dari kecepatan cahaya.) Ketiga, barangkali pembatasan terpenting pada teleportasi quantum merupakan persoalan yang sama yang dihadapi dalam komputasi quantum: objek-objek yang dibicarakan harus koheren. Kontaminasi sekecil apa pun dengan lingkungan akan merusak teleportasi quantum. Tapi ada kemungkinan di abad 21, virus pertama bisa diteleportasikan.

Menteleportasikan manusia bisa menimbulkan persoalan lain. Braunstein meninjau, "Kuncinya sekarang adalah jumlah informasi yang dilibatkan. Bahkan dengan saluran komunikasi terbaik yang bisa kita bayangkan pada saat ini, pentransferan semua informasi akan memerlukan waktu sepanjang umur alam semesta."

Fungsi Gelombang Alam Semesta

Tapi barangkali realisasi tertinggi teori quantum akan muncul ketika kita menerapkan mekanika quantum bukan hanya pada foton-foton secara tersendiri melainkan pada alam semesta keseluruhan. Stephen Hawking bersendagurau bahwa setiap kali mendengar persoalan kucing, dirinya mengulurkan tangan untuk mengambil senapan. Dia telah mengajukan solusinya sendiri untuk persoalan tersebut—fungsi gelombang alam semesta keseluruhan. Jika alam semesta keseluruhan adalah bagian dari fungsi gelombang, maka tidak memerlukan adanya seorang pengamat (yang harus eksis di luar alam semesta).

Dalam teori quantum, setiap partikel diasosiasikan dengan gelombang. Gelombang, pada gilirannya, memberitahu Anda probabilitas penemuan partikel di titik tertentu. Bagaimanapun, alam semesta, ketika masih sangat muda, lebih kecil dari partikel subatom. Oleh sebab itu, barangkali alam semesta sendiri mempunyai fungsi gelombang. Karena elektron dapat eksis dalam banyak kondisi/status pada waktu yang sama, dan karena alam semesta dahulunya lebih kecil dari elektron, barangkali alam semesta juga eksis dalam banyak status secara serempak, diterangkan oleh fungsi gelombang super.

Ini adalah variasi teori *many worlds*: tak membutuhkan adanya seorang pengamat kosmik yang dapat mengamati keseluruhan alam semesta secara serentak. Tapi fungsi gelombang Hawking sungguh berbeda dari fungsi gelombang Schrödinger. Dalam fungsi gelombang Schrödinger, di setiap titik di ruang-waktu, terdapat sebuah fungsi gelombang. Dalam fungsi gelombang Hawking, untuk setiap alam

semesta, terdapat sebuah gelombang. Sebagai ganti fungsi *psi* Schrödinger yang menerangkan semua kemungkinan status elektron, Hawking memperkenalkan fungsi *psi* yang melambangkan semua kemungkinan status alam semesta. Menurut mekanika quantum biasa, elektron eksis di ruang biasa. Namun, menurut [teori] fungsi gelombang alam semesta, fungsi gelombang eksis di "ruang super" (*super space*), ruang semua alam semesta yang mungkin ada, diperkenalkan oleh Wheeler.

Fungsi gelombang master ini (induk semua fungsi gelombang) bukan mematuhi persamaan Schrödinger (yang hanya bekerja pada elektron secara satu-satu) melainkan persamaan Wheeler-DeWitt, yang bekerja pada semua alam semesta yang mungkin eksis. Di awal 1990-an, Hawking menulis bahwa dirinya mampu memecahkan sebagian persoalan fungsi gelombang alam semestanya dan menunjukkan bahwa alam semesta yang paling mungkin adalah alam semesta dengan konstanta kosmologis yang menurun hingga menghilang. Makalah ini menimbulkan sedikit kontroversi sebab bergantung pada penjumlahan semua kemungkinan alam semesta. Hawking melakukan penjumlahan ini dengan memasukkan *wormhole* yang menghubungkan alam semesta kita dengan semua alam semesta yang mungkin eksis. (Bayangkan sebuah laut gelembung sabun yang tak terhingga yang mengapung di udara, semuanya terhubung oleh filamen tipis atau *wormhole*, dan kemudian jumlahkan mereka semuanya.)

Akhirnya, timbul keraguan tentang metode ambisius Hawking.

Disebutkan bahwa penjumlahan semua kemungkinan alam semesta adalah penjumlahan yang tidak dapat diandalkan secara matematis, setidaknya sampai kita memiliki sebuah "*theory of everything*" untuk memandu kita. Sebelum *theory of everything* terbentuk, para kritikus berargumen bahwa seseorang tidak bisa betul-betul mempercayai suatu kalkulasi mengenai mesin waktu, *wormhole*, jenak *big bang*, dan fungsi gelombang alam semesta.

Namun, hari ini, banyak fisikawan percaya bahwa kita akhirnya telah menemukan *theory of everything*, walaupun masih belum dalam bentuk finalnya: teori string, atau Teori-M. Akankah teori ini memungkinkan kita "membaca Pikiran Tuhan", sebagaimana Einstein yakini?

Bab 7
Teori-M: Induk Semua String

Bagi seseorang yang memahami Alam Semesta dari sudut pandang final, seluruh penciptaan akan terlihat sebagai satu-satunya kebenaran dan keharusan.

—J. D'Alembert

Saya merasa kita begitu dekat dengan teori string sampai-sampai dalam saat-saat optimisme tertinggi saya, saya membayangkan bahwa suatu hari nanti, bentuk final teori ini akan keluar dari langit dan bumi ke pangkuan seseorang. Tapi secara lebih realistis, saya merasa kita sekarang berada dalam proses pembentukan sebuah teori yang jauh lebih dalam dibanding teori mana pun yang kita miliki sebelumnya dan bahwa memasuki abad 21, ketika saya terlalu tua untuk mempunyai pemikiran berguna tentang subjek ini, fisikawan muda akan harus memutuskan apakah kita betul-betul telah menemukan teori final.

—Edward Witten

Novel klasik tahun 1897 karangan H. G. Wells, *The Invisible Man*, diawali dengan sebuah kisah aneh. Suatu hari di musim dingin, seorang asing datang dari kegelapan dengan berpakaian ganjil. Wajahnya tertutup sepenuhnya; dia mengenakan kacamata berwarna biru gelap, dan perban putih menyelimuti seluruh wajahnya.

Mulanya, warga desa mengasihaninya, beranggapan bahwa dia mengalami kecelakaan mengerikan. Tapi hal-hal aneh terjadi di desa. Suatu hari, wanita pemilik pemondokan masuk ke kamar sang pria asing yang kosong dan menjerit sewaktu melihat pakaian bergerak-gerak sendiri. Topi-topi berputar di sekeliling kamar, seprei dan sarung bantal melompat ke udara, kursi-kursi bergerak, dan "perabot rumah menjadi gila", kenangnya sambil ketakutan.

Tak lama, seluruh desa ramai membicarakan rumor tentang kejadian tak biasa ini. Akhirnya, sekelompok warga desa berkumpul dan berhadapan muka dengan sang pria misterius. Yang mengherankan mereka, dia perlahan-lahan mulai membuka perbannya. Kerumunan itu terperanjat. Tanpa perban, wajah sang orang asing hilang sama sekali. Kenyataannya, dia tidak bisa dilihat. Kegemparan meletus, orang-orang memekik dan menjerit. Warga desa mencoba mengejar orang asing itu, yang dengan mudah menghindari mereka.

Setelah melakukan sederetan kejahatan kecil, sang pria tak terlihat itu mencari-cari seorang kenalan lama dan menceritakan panjang lebar kisahnya yang luar biasa. Nama aslinya adalah Tuan Griffen dari University College. Walaupun memulai dengan mempelajari pengobatan, dia menemukan sebuah cara revolusioner untuk

mengubah sifat refraktif (pembiasan) dan reflektif (pemantulan) daging. Rahasia dia adalah dimensi keempat. Dia berseru kepada Dr. Kemp, "Saya menemukan sebuah prinsip umum...sebuah rumus, sebuah ekspresi geometri yang melibatkan empat dimensi."

Sayang, bukannya memanfaatkan temuan besarnya untuk membantu manusia, yang dipikirkannya ialah merampok dan keuntungan pribadi. Dia berniat merekrut temannya itu sebagai antek. Bersama-sama, klaimnya, mereka bisa menjarah dunia. Tapi si teman ketakutan dan memberitahukan keberadaan Tn. Griffen ke polisi. Ini membawa pada perburuan terakhir, di mana sang pria tak terlihat itu akhirnya terluka sampai mati.

Sebagaimana pada novel-novel sains fiksi hebat, terdapat prinsip sains dalam banyak kisah karangan H. G. Wells. Seseorang yang dapat menyadap dimensi ruang keempat (atau yang hari ini disebut dimensi kelima, dengan waktu sebagai dimensi keempat) bisa betul-betul menjadi tak terlihat, dan bahkan bisa mendapat kekuatan yang normalnya diatributkan pada hantu dan dewa. Untuk sejenak bayangkan, sebuah ras makhluk mitos dapat menghuni dunia dua-dimensi permukaan meja, seperti dalam novel tahun 1884 karangan Edwin Abbot, *Flatland*. Mereka menjalankan urusan mereka tanpa menyadari bahwa sebuah alam semesta, dimensi ketiga, mengelilingi mereka.

Tapi bila seorang ilmuwan Flatland bisa melakukan eksperimen yang memungkinkan dirinya melayang beberapa inchi di atas meja, dia akan menjadi tak terlihat, sebab cahaya akan melintas di

bawahnya seolah-olah dia tidak eksis. Mengapung persis di atas Flatland, dia dapat melihat peristiwa-peristiwa terhampar di permukaan meja. Melayang di *hyperspace* (ruang hiper) memiliki keuntungan yang pasti, karena seseorang yang melihat ke bawah dari *hyperspace* akan mempunyai kekuatan dewa.

Tidak hanya cahaya akan melintasi di bawahnya, yang menjadikannya tak terlihat, dia juga bisa melangkaui objek-objek. Dengan kata lain, dia bisa menghilang semaunya dan berjalan menembus dinding. Dengan melompat ke dimensi ketiga, dia akan lenyap dari alam semesta Flatland. Dan bila dia melompat kembali ke permukaan meja itu, dia akan mendadak mewujud ulang entah dari mana. Karena itu dia dapat melarikan diri dari penjara. Penjara di Flatland terdiri dari sebuah lingkaran yang digambar mengelilingi tahanan, sehingga akan mudah untuk melompat ke dimensi ketiga dan pergi ke luar.

Adalah mustahil untuk menjaga rahasia dari penghuni *hyperspace*. Emas yang terkunci di ruang besi dapat dengan mudah dilihat dari titik menguntungkan di dimensi ketiga, sebab ruang besi tersebut hanya berupa bujur sangkar terbuka. Akan mudah untuk memasuki bujur sangkar dan mengangkat emas tanpa harus menerobos ruang besi. Pembedahan akan bisa dilakukan tanpa memotong kulit.

Demikian halnya, H. G. Wells ingin menyampaikan ide bahwa menurut dunia empat-dimensi, kita adalah penghuni Flatland, tak menyadari fakta bahwa bidang eksistensi yang lebih tinggi mungkin sedang melayang tepat di atas [bidang eksistensi] kita. Kita percaya

dunia kita terdiri dari semua hal yang dapat kita lihat, tak sadar bahwa mungkin terdapat alam semesta-alam semesta persis di atas hidung kita. Walaupun alam semesta lain mungkin sedang melayang-layang beberapa inchi saja di atas kita, mengapung di dimensi keempat, ia tak terlihat.

Karena penghuni *hyperspace* memiliki kekuatan manusia super yang biasanya diatributkan pada hantu atau arwah, dalam sebuah kisah fiksi sains lainnya, H. G. Wells merenungkan pertanyaan tentang apakah makhluk supernatural menghuni dimensi lebih tinggi. Dia mengangkat satu pertanyaan kunci yang hari ini menjadi subjek spekulasi dan penelitian hebat: mungkinkah terdapat hukum fisika baru di dimensi-dimensi lebih tinggi ini? Dalam novel tahun 1895-nya, *The Wonderful Visit,* senapan seorang vikaris/paderi tak sengaja mengenai malaikat, yang kebetulan sedang melintasi dimensi kita. Untuk suatu alasan kosmik, dimensi kita dan sebuah alam semesta paralel bertubrukan secara sementara, memperkenankan sang malaikat jatuh ke dunia kita. Dalam kisah itu, Wells menulis, "Mungkin terdapat sejumlah Alam Semesta tiga-dimensi yang berdesakan berdampingan." Si paderi menanyai malaikat yang terluka itu. Dia terguncang mengetahui bahwa hukum alam kita tak berlaku di dunia malaikat. Di alam semesta malaikat, misalnya, tidak ada bidang, tapi silinder, jadi ruang sendiri melengkung. (Sekurangnya 20 tahun sebelum teori relativitas umum Einstein, Wells mempunyai pemikiran tentang alam semesta-alam semesta yang eksis di permukaan melengkung.) Sebagaimana dikatakan si paderi, "Geometri mereka

berbeda karena ruang mereka mempunyai lengkungan sehingga semua bidang mereka silinder; dan hukum Gravitasi mereka tidak berdasarkan hukum kuadrat terbalik, dan terdapat 420 warna utama, tak hanya tiga." Lebih dari seabad setelah Wells menulis kisahnya, hari ini fisikawan menyadari bahwa hukum fisika baru, dengan partikel subatom, atom, dan interaksi kimiawi berbeda, mungkin betul-betul eksis di alam semesta-alam semesta paralel. (Sebagaimana akan kita lihat di bab 9, beberapa eksperimen kini tengah dijalankan untuk mendeteksi keberadaan alam semesta paralel yang mungkin sedang melayang-layang persis di atas kita.)

Konsep *hyperspace* telah memikat para seniman, musisi, penganut mistik, teolog, filsuf, terutama mendekati awal abad 20. Menurut sejarawan seni, Linda Dalrymple Henderson, minat Pablo Picasso terhadap dimensi keempat telah mempengaruhi gaya *cubism*[13]. (Mata wanita-wanita yang dilukis Picasso menatap langsung ke kita, meskipun hidung mereka menghadap ke samping, memungkinkan kita memandang wanita-wanita lukisan tersebut secara keseluruhan. Demikian pula halnya, penghuni *hyperspace* yang memandang ke kita akan melihat kita secara keseluruhan: depan, belakang, dan samping secara serempak.) Dalam lukisan terkenalnya, *Christus Hypercubus*, Salvador Dali melukis Yesus Kristus yang disalib di depan sebuah *hypercube* empat-dimensi yang terurai/lepas-lepas, atau *tesseract*[14]. Dalam lukisannya, *The Persistence of Memory*, Dali mencoba

13 Gaya dalam seni, terutama seni lukis, di mana objek digambarkan secara geometris—penj.

14 Blok persegi kecil yang dipakai dalam mosaik—penj.

menyampaikan gagasan waktu sebagai dimensi keempat dengan jam yang meleleh. Dalam lukisan karya Marcel Duchamp, *Nude Descending a Staircase (No. 2)*, kita melihat seorang telanjang dalam gerak *time-lapse* (lambat) sedang berjalan menuruni tangga, sebuah upaya lain untuk menangkap dimensi keempat (waktu) di permukaan dua-dimensi.

Teori-M

Hari ini, misteri dan legenda seputar dimensi keempat sedang dihidupkan kembali untuk alasan yang sama sekali berbeda: perkembangan teori string dan inkarnasi terbarunya, Teori-M. Secara historis, konsep *hyperspace* telah ditentang kuat oleh para fisikawan; mereka memperolok bahwa dimensi tinggi merupakan bidang penganut mistik dan dukun. Ilmuwan yang serius mengajukan eksistensi dunia gaib menjadi sasaran ejekan.

Dengan kedatangan Teori-M, semua itu berubah. Dimensi tinggi kini menjadi pusat revolusi mendalam dalam fisika karena fisikawan terpaksa berhadapan dengan persoalan terhebat yang dimiliki fisika hari ini: jurang antara relativitas umum dan teori quantum. Yang menarik, dua teori ini tersusun dari seluruh pengetahuan fisika mengenai alam semesta pada level fundamental. Saat ini, hanya Teori-M yang mempunyai kesanggupan menyatukan dua teori alam semesta yang hebat namun terlihat kontradiktif ini menjadi kesatuan koheren, untuk menghasilkan sebuah "*theory of everything*". Dari semua teori yang diajukan di abad lalu, satu-satunya kandidat yang berpotensi

"membaca Pikiran Tuhan", sebagaimana Einstein mengatakannya, adalah Teori-M.

Hanya di *hyperspace* sepuluh-dimensi atau sebelas-dimensi kita mempunyai "cukup ruang" untuk menyatukan semua gaya alam dalam satu teori elegan. Teori sehebat itu akan sanggup menjawab pertanyaan-pertanyaan abadi: Apa yang terjadi sebelum permulaan [masa]? Bisakah waktu dibalik? Bisakah gerbang dimensi membawa kita menyeberangi alam semesta? (Walaupun para pengkritik benar mengatakan bahwa pengujian teori ini berada di luar kemampuan eksperimen kita di masa kini, terdapat sejumlah eksperimen yang tengah direncanakan yang mungkin mengubah situasi ini, sebagaimana akan kita simak nanti di bab 9.)

Semua upaya selama 50 tahun terakhir untuk menghasilkan uraian final alam semesta telah berakhir dalam kegagalan memalukan. Secara konsep, ini mudah dipahami. Relativitas umum dan teori quantum adalah oposisi diametris dalam hampir semua hal. Relativitas umum adalah teori tentang [objek-objek] yang sangat besar: *black hole, big bang,* quasar, dan alam semesta yang mengembang. Ia didasarkan pada matematika permukaan lembut, seperti seprei kasur dan jala trampolin. Teori quantum kebalikannya—ia menguraikan dunia [objek-objek] sangat kecil: atom, proton dan neutron, dan quark. Ia didasarkan pada teori mengenai paket-paket energi terpisah yang disebut quantum. Tak seperti relativitas, teori quantum menyatakan bahwa hanya probabilitas peristiwa yang dapat dikalkulasi, jadi kita takkan pernah tahu pasti di mana persisnya sebuah elektron berada.

Dua teori ini berlandaskan matematika yang berlainan, asumsi yang berlainan, prinsip fisika yang berlainan, dan domain yang berlainan. Tak heran bila semua upaya untuk menyatukan keduanya tidak berdaya.

Raksasa-raksasa fisika—Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, dan Arthur Eddington—yang menyusul Einstein telah mencoba menghasilkan *unified field theory*, namun sayangnya gagal. Pada 1928, Einstein tak sengaja menimbulkan respon media dengan versi awal *unified field theory*-nya. *New York Times* bahkan mempublikasikan bagian-bagian makalah itu, termasuk persamaan-persamaannya. Lebih dari seratusan reporter berkerumun di luar rumahnya. Menulis dari Inggris, Eddington memberikan komentar kepada Einstein, "Kau mungkin terhibur mendengar bahwa salah satu departemen store besar kami di London (Selfridges) telah memasang makalah-mu di jendelanya (enam halaman makalah yang ditempel berdampingan) supaya orang-orang yang lewat dapat membacanya sampai selesai. Kerumunan besar berkumpul untuk membacanya."

Pada 1946, Erwin Schrödinger juga terserang penyakit dan menemukan apa yang dia pikir merupakan *unified field theory* yang banyak dikhayalkan orang. Tergesa-gesa, dia melakukan sesuatu yang agak tak biasa untuk masanya (tapi tidak begitu aneh di masa kini): dia mengadakan konferensi pers. Bahkan perdana menteri Irlandia, Eamon De Valera, datang untuk mendengarkan Schrödinger. Saat ditanya seberapa yakin dirinya telah menemukan *unified field theory*, dia menjawab, "Saya yakin saya benar. Saya akan terlihat tolol jika

saya salah." (*New York Times* akhirnya mengetahui tentang konferensi pers ini dan mengirimkan manuskripnya ke Einstein dan yang lainnya untuk dikomentari. Sayang sekali, Einstein sadar bahwa Schrödinger menemukan ulang sebuah teori lama yang telah dia (Einstein) ajukan beberapa tahun sebelumnya dan dia buang. Einstein bersikap santun dalam responnya, tapi Schrödinger merasa terhina.)

Pada 1958, fisikawan Jeremy Bernstein menghadiri sebuah pembicaraan di Universitas Columbia di mana Wolfgang Pauli mempresentasikan *unified field theory* versi miliknya, yang dia kembangkan bersama Werner Heisenberg. Niels Bohr, yang ada di antara hadirin, tidak terkesan. Akhirnya, Bohr bangkit dan berkata, "Kami di belakang merasa yakin bahwa teori Anda gila. Tapi yang memecah kami adalah apakah teori Anda cukup gila."

Pauli segera mengetahui maksud Bohr—bahwa teori Heisenberg-Pauli terlalu konvensional, terlalu biasa untuk menjadi *unified field theory*. Untuk "membaca Pikiran Tuhan" diperlukan pengenalan matematika dan ide yang berbeda secara radikal.

Banyak fisikawan merasa yakin ada sebuah teori sederhana, elegan, dan memaksa di balik segala sesuatu meskipun cukup gila dan absurd untuk dianggap benar. John Wheeler dari Princeton mengatakan bahwa, di abad ke 19, menjelaskan keanekaragaman kehidupan yang ditemukan di Bumi terasa sia-sia. Tapi kemudian Charles Darwin memperkenalkan teori seleksi alam, dan satu teori [ini] menyediakan arsitektur untuk menerangkan asal-usul dan keanekaragaman semua kehidupan di Bumi.

Peraih Nobel, Steven Weinberg, menggunakan analogi berbeda. Selain Columbus, peta-peta yang menggambarkan keberanian para penjelajah awal Eropa mengindikasikan dengan kuat bahwa pasti ada "kutub utara", tapi tak ada bukti langsung tentang eksistensinya. Karena semua peta Bumi memperlihatkan celah besar di mana kutub utara semestinya berlokasi, para penjelajah awal berasumsi bahwa kutub utara pasti eksis, walaupun tak ada dari mereka yang pernah mendatanginya. Demikian pula halnya, fisikawan masa kini, seperti penjelajah awal, menemukan banyak bukti tak langsung yang mengarah pada eksistensi sebuah *theory of everything*, walaupun saat ini tak ada konsensus universal tentang teori tersebut.

Sejarah Teori String

Teori yang jelas-jelas "cukup gila" untuk menjadi *unified field theory* adalah teori string, atau Teori-M. Teori string mempunyai sejarah yang barangkali paling ganjil dalam catatan fisika. Ia ditemukan secara kebetulan sama sekali, diterapkan pada persoalan yang keliru, diasingkan sampai tidak dikenal, dan tiba-tiba dihidupkan kembali sebagai *theory of everything*. Dan menurut analisis terakhir, karena mustahil membuat penyesuaian kecil tanpa merusak teori, ia akan menjadi "*theory of everything*" atau "*theory of nothing*" belaka.

Alasan atas sejarah aneh ini adalah bahwa teori string berkembang secara terbalik. Normalnya, dalam sebuah teori seperti misalnya relativitas, seseorang memulai dengan prinsip-prinsip fisika fundamental. Kemudian, prinsip-prinsip ini diasah pada seperangkat

persamaan klasik dasar. Terakhir, dia mengkalkulasi fluktuasi quantum pada persamaan-persamaan ini. Teori string berkembang terbalik, memulai dengan penemuan teori quantumnya secara kebetulan; fisikawan masih memikirkan prinsip fisika apa saja yang memandu teori tersebut.

Awal-mula teori string bermula pada tahun 1968, ketika dua fisikawan belia di laboratorium nuklir di CERN, Genewa, Gabriele Veneziano dan Mahiko Suzuki, secara terpisah membalik-balik halaman sebuah buku matematika dan menemukan fungsi Euler Beta, sebuah ekspresi matematika samar dari abad 18 yang ditemukan oleh Leonard Euler, yang anehnya menguraikan dunia subatom. Mereka terheran bahwa rumus abstrak matematika ini menguraikan tubrukan dua partikel meson π pada energi sangat besar. Tak lama kemudian, model Veneziano menciptakan sensasi luar biasa dalam fisika, dengan ratusan makalah yang berupaya menggeneralisirnya untuk menguraikan gaya nuklir.

Dengan kata lain, teori ini ditemukan murni secara kebetulan. Edward Witten dari Institute for Advanced Study (sosok yang diyakini banyak orang sebagai mesin kreatif di balik banyak terobosan mempesona dalam teori ini) mengatakan, "Menurut aturan, fisikawan abad 20 semestinya tidak punya hak untuk mempelajari teori ini. Menurut aturan, teori string semestinya tidak ditemukan."

Saya ingat dengan gamblang kegemparan yang ditimbulkan teori string. Saat itu saya masih menjadi mahasiswa sarjana fisika di Universitas California, Berkeley, dan saya ingat melihat para fisikawan

menggelengkan kepala dan menyatakan bahwa fisika seharusnya tidak seperti ini. Di masa lalu, fisika biasanya didasarkan pada observasi alam secara detil dan menyusahkan, merumuskan beberapa hipotesis parsial, menguji ide dengan data secara seksama, dan kemudian mengulangi proses tersebut, lagi dan lagi. Teori string adalah metode naluriah yang didasarkan pada penebakan jawaban belaka. Jalan pintas yang menyesakkan nafas seperti itu seharusnya tidak terjadi.

Karena partikel-partikel subatom tidak dapat dilihat sekalipun dengan instrumen kita yang paling hebat, fisikawan mengambil jalan yang brutal namun efektif untuk menganalisa mereka, menubrukkan mereka secara bersama-sama dengan energi sangat besar. Miliaran dolar telah dihabiskan untuk membangun "*atom smasher*", atau akselerator partikel, yang panjangnya bermil-mil, menciptakan sorot partikel subatom yang saling bertubrukan. Fisikawan lalu meng-analisis dengan teliti puing dari tubrukan tersebut. Sasaran dari proses menyusahkan dan berat ini adalah menyusun serangkaian bilangan, yang disebut *scattering matrix* (matriks berpencar), atau S-matrix. Kumpulan bilangan ini sangat krusial karena meng-*encode* semua informasi fisika subatom di dalamnya—dengan kata lain, jika seseorang mengetahui S-matrix, dia bisa menyimpulkan semua atribut/sifat partikel unsur.

Salah satu sasaran fisika partikel unsur adalah memprediksikan struktur matematis S-matrix untuk interaksi [nuklir] kuat, sebuah sasaran yang begitu sulit sampai-sampai beberapa fisikawan merasa

yakin itu di luar jangkauan fisika yang dikenal. Maka seseorang bisa membayangkan sensasi yang ditimbulkan oleh Veneziano dan Suzuki ketika mereka cukup menebak S-matrix dengan membolak-balik halaman sebuah buku matematika.

Modelnya sama sekali berbeda dari yang pernah kita lihat sebelumnya. Biasanya, ketika seseorang mengajukan teori baru (seperti quark), fisikawan mencoba menguji teori tersebut secara sembarang, mengubah parameter-parameter sederhana (seperti massa partikel atau kekuatan keberpasangan). Tapi model Veneziano dibuat dengan begitu halus sehingga disturbansi sekecil apa pun pada kesimetrian dasarnya akan merusak seluruh rumus. Seperti pada potongan kristal yang dibuat secara halus, setiap upaya untuk mengubah bentuknya akan menghancurkannya.

Dari ratusan makalah yang secara sepele memodifikasi parameternya, sehingga merusak keindahannya, tak ada yang bertahan sampai hari ini. Makalah yang masih diingat hanyalah makalah yang berusaha memahami mengapa teori tersebut bekerja—yakni, makalah yang mencoba mengungkap kesimetriannya. Akhirnya, fisikawan tahu bahwa teori tersebut tidak mempunyai parameter yang bisa disetel-setel sama sekali.

Model Veneziano, betapa pun luar biasa, masih mempunyai beberapa persoalan. Pertama, fisikawan menyadari bahwa itu hanya penaksiran paling awal terhadap S-matrix final dan bukan merupakan gambaran menyeluruh. Bunji Sakita, Miguel Virasoro, dan Keiji Kikkawa, kala itu di Universitas Wisconsin, menyadari bahwa S-matrix

bisa dipandang sebagai serangkaian suku tak terhingga, dan bahwa model Veneziano hanyalah suku pertama dan terpenting dalam rangkaian itu. (Kasarnya, tiap-tiap suku dalam rangkaian mewakili jumlah cara partikel-partikel saling menubruk. Mereka mempostulatkan beberapa aturan yang dengannya seseorang bisa menyusun suku lebih tinggi dalam penaksiran mereka. Untuk tesis Ph.D. saya, saya memutuskan menyelesaikan program ini dengan teliti dan menyusun semua kemungkinan koreksi untuk model Veneziano. Bersama-sama dengan kolega saya, L. P. Yu, saya mengkalkulasi set suku koreksi yang tak terhingga untuk model tersebut.)

Terakhir, Yoichiro Nambu dari Universitas Chicago dan Tetsuo Goto dari Universitas Nihon mengidentifikasi fitur kunci yang membuat model tersebut bekerja—string yang bervibrasi. (Penelitian pada jalur ini dikerjakan pula oleh Leonard Susskind dan Holger Nielsen.) Ketika sebuah string bertubrukan dengan string lain, itu menghasilkan S-matrix yang diuraikan oleh model Veneziano. Menurut gambaran ini, setiap partikel tak lain adalah vibrasi atau not string. (Nanti saya bahas konsep ini secara detil.)

Kemajuan berjalan sangat pesat. Pada 1971, John Schwarz, André Neveu, dan Pierre Ramond menggeneralisir model string agar mencakup komponen baru yang disebut *spin* (putaran/pusingan), menjadikannya sebagai kandidat realistis untuk interaksi partikel. (Semua partikel subatom, sebagaimana akan kita lihat, terlihat berpusing seperti gasing mini. Jumlah pusingan tiap partikel subatom, dalam satuan quantum, adalah bilangan bulat seperti 0, 1, 2, atau

bilangan bulat setengah seperti ½, 3/2. Yang luar biasa, string Neveu-Schwarz-Ramond itu persis menghasilkan pola pusingan ini.)

Namun, saya masih belum puas. Model dual resonansi tersebut, sebagaimana sebutannya saat itu, merupakan sekumpulan rumus dan aturan aneh yang longgar. Selama 150 tahun sebelumnya, seluruh fisika didasarkan pada "medan", sebab diperkenalkan pertama kali oleh fisikawan Inggris, Michael Faraday. Bayangkan garis-garis medan magnet yang dihasilkan oleh sebatang magnet. Seperti jaring laba-laba, garis-garis gaya merembesi seluruh ruang. Di setiap titik di ruang, Anda dapat mengukur kekuatan dan arah garis-garis gaya magnet. Demikian halnya, sebuah medan adalah objek matematis yang memikul harga-harga berbeda di setiap titik di ruang. Karenanya, medan tersebut menentukan ukuran kekuatan gaya magnet, listrik, atau nuklir di setiap titik di alam semesta. Atas alasan ini, uraian fundamental mengenai listrik, magnetisme, gaya nuklir, dan gravitasi didasarkan pada medan. Mengapa string mesti berbeda? Yang dibutuhkan adalah "*field theory of string*" (teori string medan) yang memungkinkan seseorang meringkas seluruh kandungan teori ke dalam persamaan tunggal.

Pada 1974, saya memutuskan mengerjakan persoalan ini. Bersama kolega saya, Keiji Kikkawa dari Universitas Osaka, saya berhasil menggali teori string medan. Dalam sebuah persamaan yang panjangnya hampir tidak satu setengah inchi, kita dapat meringkas semua informasi yang terkandung dalam teori string. Setelah teori string medan dirumuskan, saya harus meyakinkan komunitas besar

fisika akan kekuatan dan keindahannya. Saya menghadiri sebuah konferensi fisika teoritis di Aspen Center di Colorado pada musim panas waktu itu dan memberikan seminar kepada sekelompok kecil, namun pilihan, fisikawan. Saya betul-betul gugup: di antara hadirin terdapat dua peraih Nobel, Murray Gell-Mann dan Richard Feynman, yang terkenal suka mengajukan pertanyaan tajam menusuk yang acapkali membuat pembicara bingung. (Pernah, saat Steven Weinberg sedang memberi ceramah, dia menuliskan sebuah sudut di papan tulis, dilabeli dengan huruf W, yang disebut sudut Weinberg sebagai penghormatan atas dirinya. Feynman kemudian bertanya, apa yang direpresentasikan oleh W di papan tulis itu. Sewaktu Weinberg mulai menjawab, Feynman berteriak *"Wrong!"* yang membuat hadirin terpecah. Feynman mungkin telah menghibur hadirin, tapi Weinberg yang menang. Sudut ini merepresentasikan bagian krusial teori Weinberg yang menyatukan interaksi elektromagnet dan interaksi [nuklir] lemah, dan yang akhirnya membuatnya memenangkan Hadiah Nobel.)

Dalam pembicaraan saya, saya menekankan bahwa teori string medan akan menghasilkan pendekatan paling sederhana dan komprehensif menuju teori string, yang sebagian besar merupakan sekumpulan rumus terputus-putus dan beraneka warna. Dengan teori string medan, seluruh teori bisa diringkas dalam satu persamaan sepanjang sekitar satu setengah inchi—semua atribut model Veneziano, semua suku penaksiran perturbasi tak terhingga, dan semua atribut string yang berpusing bisa diperoleh dari sebuah

persamaan yang pas di atas kue keberuntungan. Saya menekankan kesimetrian string teori yang memberinya keindahan dan kekuatan. Ketika string-string bergerak di ruang-waktu, mereka menyapu permukaan dua-dimensi, menyerupai strip. Teorinya tetap sama, tak peduli koordinat mana yang kita gunakan untuk menerangkan permukaan dua-dimensi ini. Saya takkan pernah melupakan ketika, sesudah itu, Feynman menghampiri saya dan berkata, "Saya mungkin tidak sepenuhnya sependapat dengan teori string, tapi pembicaraan yang Anda berikan adalah salah satu pembicaraan paling menawan yang pernah saya dengar."

Sepuluh Dimensi

Tapi persis saat teori string sedang menanjak, ia segera terurai. Claude Lovelace dari Rutgers menemukan bahwa model asli Veneziano memiliki cacat matematis kecil yang hanya dapat dilenyapkan jika ruang-waktu mempunyai 26 dimensi. Demikian pula, model superstring Neveu, Schwarz, dan Ramond hanya dapat eksis di 10 dimensi. Ini mengguncangkan para fisikawan. Ini tak pernah terlihat sebelumnya dalam seluruh sejarah sains. Tak ada di mana pun juga kita menemukan sebuah teori yang memilih dimensionalitasnya sendiri. Teori-teori Newton dan Einstein, misalnya, bisa dirumuskan di suatu dimensi. Hukum gravitasi kuadrat terbalik, contohnya, bisa digeneralisir menjadi hukum kubik terbalik di empat dimensi. Namun teori string hanya dapat eksis di dimensi khusus.

Dari sudut pandang praktis, ini merupakan bencana. Dunia kita,

diyakini secara universal, eksis di tiga dimensi ruang (*length*/panjang, *width*/lebar, dan *breadth*/ketebalan/kedalaman) dan satu dimensi waktu. Mengakui alam semesta sepuluh-dimensi mengandung arti bahwa teori tersebut berhampiran dengan sains fiksi. Teoris string menjadi sasaran lelucon. (John Schwarz mengingat saat dirinya naik elevator bersama Richard Feynman, yang berkelakar kepadanya, "*Well*, John, di berapa dimensi kau hidup sekarang?") Tapi tak peduli bagaimanapun fisikawan string mencoba menyelamatkan model tersebut, upaya itu segera layu. Hanya orang-orang keras kepala yang terus mengerjakan teori tersebut. Upaya sunyi ini berlangsung selama periode ini.

Dua orang keras kepala yang terus mengerjakan teori tersebut selama tahun-tahun suram ini adalah John Schwarz dari Cal Tech dan Joël Scherk dari École Normale Supérieure di Paris. Sampai saat itu, model string tersebut dianggap hanya menerangkan interaksi nuklir kuat. Tapi ada satu persoalan: model itu memprediksikan sebuah partikel yang tidak terdapat dalam interaksi kuat, sebuah partikel aneh bermassa nol yang memiliki 2 unit pusingan quantum. Semua upaya untuk membuang partikel menjengkelkan ini telah gagal. Setiap kali seseorang mencoba menyingkirkan partikel 2-pusingan ini, model tersebut runtuh dan kehilangan atribut ajaibnya. Entah bagaimana, partikel 2-pusingan yang tak diinginkan ini kelihatannya memegang rahasia model secara keseluruhan.

Lalu Scherk dan Schwarz membuat penaksiran berani. Mungkin cacat tersebut sebetulnya adalah berkah. Jika mereka menginter-

pretasikan ulang partikel 2-pusingan yang mencemaskan ini sebagai graviton (partikel gravitasi yang muncul dari teori Einstein), maka teori itu betul-betul memasukkan teori gravitasi Einstein! (Dengan kata lain, teori relativitas umum Einstein muncul sebagai vibrasi atau not superstring terendah.) Ironisnya, sementara dalam teori quantum lain para fisikawan mencoba kuat menghindari penyebutan gravitasi, teori string justru menuntutnya. (Kenyataannya, itu merupakan salah satu fitur menarik teori string—ia harus memasukkan gravitasi atau, kalau tidak, teori ini akan inkonsisten.) Dengan lompatan berani ini, ilmuwan menyadari bahwa model string diterapkan secara tidak tepat pada persoalan yang salah. Ia bukan ditakdirkan sebagai teori interaksi nuklir kuat saja; malah, ia merupakan *theory of everything*. Sebagaimana ditekankan Witten, fitur menarik teori string adalah bahwa ia menuntut kehadiran gravitasi. Sementara teori medan standar telah gagal selama berdekade-dekade untuk memasukkan gravitasi, dalam teori string justru gravitasi betul-betul merupakan keharusan.

Namun ide seminal Scherk dan Schwarz diabaikan bersama. Agar teori string bisa menerangkan gravitasi maupun dunia subatom, string-string harus memiliki panjang hanya 10^{-33} cm (panjang Planck); dengan kata lain, mereka semiliar miliar kali lebih kecil daripada proton. Ini terlalu berat bagi kebanyakan fisikawan untuk diterima.

Pada pada 1980-an, upaya-upaya lain dalam *unified field theory* menjalankan perjuangannya. Teori-teori yang mencoba, dengan naif-nya, membubuhkan gravitasi pada Standard Model tenggelam dalam

rawa ketakterhinggaan (yang akan saya jelaskan secara singkat). Setiap kali seseorang mencoba secara artifisial mengawinkan gravitasi dengan gaya quantum lain, itu mengakibatkan inkonsistensi matematis yang mematikan teorinya. (Einstein percaya bahwa Tuhan mungkin tidak mempunyai pilihan dalam menciptakan alam semesta. Alasan untuk ini barangkali adalah bahwa hanya teori tunggal yang bebas dari semua keinkonsistenan matematis ini.)

Keinkonsistenan matematis tersebut terdapat dua jenis. Yang pertama adalah persoalan ketakterhinggaan. Biasanya, fluktuasi quantum kecil sekali. Efek-efek quantum biasanya hanya menjadi koreksi kecil bagi hukum gerak Newton. Inilah alasannya mengapa kita dapat, sebagian besarnya, mengabaikan mereka di dunia makroskopis kita—mereka terlampau kecil untuk teramati. Namun, manakala gravitasi diubah menjadi teori quantum, fluktuasi-fluktuasi quantum ini menjadi tak terhingga, yang mana tak masuk akal. Inkonsistensi matematis kedua berurusan dengan "anomali", penyimpangan-penyimpagan kecil dalam teori yang muncul saat kita menambahkan fulktuasi quantum pada teori. Anomali ini merusak kesimetrian awal teori, sehingga merampok kekuatan aslinya.

Contoh, bayangkan seorang perancang roket yang harus menciptakan kendaraan licin dan lancar untuk mengiris menembus atmosfer. Roket itu harus mempunyai kesimetrian tinggi demi mengurangi gesekan dan hambatan udara (dalam kasus ini adalah kesimetrian silinder, jadi roket tetap sama manakala kita memutarnya pada porosnya). Kesimetrian ini disebut $O(2)$. Tapi ada dua persoalan

potensial. Pertama, karena roket berjalan pada kecepatan demikian tinggi, vibrasi bisa terjadi pada sayap. Biasanya, vibrasi ini sama sekali kecil pada pesawat udara subsonik. Namun, perjalanan pada kecepatan hipersonik, intensitas fluktuasi-fluktuasi ini bisa meningkat dan akhirnya melepas sayap. Divergensi serupa mengganggu teori gravitasi quantum. Normalnya, mereka begitu kecil sehingga bisa diabaikan, tapi menurut teori gravitasi quantum, mereka membesar di hadapan Anda.

Persoalan kedua terkait kapal roket itu adalah bahwa retakan kecil bisa terjadi pada lambung kapal. Cacat ini merusak kesimetrian awal $O(2)$ kapal roket. Meski kecil, cacat-cacat ini akhirnya dapat menyebar dan merobek lambung kapal. Demikian pula halnya, "retakan" seperti itu bisa mematikan kesimetrian sebuah teori gravitasi.

Ada dua cara untuk memecahkan persoalan ini. Yang pertama adalah menemukan solusi Plester-Luka, seperti memplester retakan dengan lem dan memperkuat sayap dengan tongkat, dengan harapan roket tidak akan meledak di atmosfer. Pendekatan ini secara historis diambil oleh kebanyakan fisikawan dalam mencoba mengawinkan teori quantum dengan gravitasi. Mereka mencoba menyembunyikan dua persoalan ini. Cara kedua adalah mengulang semuanya dari awal, dengan bentuk baru dan material baru dan eksotis yang mampu bertahan terhadap tekanan-tekanan perjalanan antariksa.

Fisikawan sudah menghabiskan berdekade-dekade untuk mencoba memplester teori gravitasi quantum, namun justru mendapatinya dipenuhi dengan divergensi dan anomali baru. Lambat laun, mereka

menyadari bahwa solusinya mungkin adalah membuang pendekatan Plester-Luka dan mengadopsi teori yang sama sekali baru.

Kereta Musik String

Pada 1984, gelombang pasang menentang teori string tiba-tiba berbalik. John Schwarz dari Cal Tech dan Mike Green, kala itu di Queen Mary's College di London, memperlihatkan bahwa teori string sama sekali tidak mengandung inkonsistensi yang telah membinasakan begitu banyak teori lain. Fisikawan sudah tahu bahwa teori string bebas dari divergensi matematis. Tapi Schwarz dan Green menunjukkan bahwa ia juga bebas dari anomali. Alhasil, teori string menjadi kandidat utama (dan hari ini satu-satunya) untuk *theory of everything*.

Mendadak, sebuah teori yang pada esensinya telah dianggap mati, dihidupkan kembali. Dari *theory of nothing*, teori string tiba-tiba menjadi *theory of everything*. Banyak fisikawan berusaha mati-matian untuk membaca makalah-makalah tentang teori string. Hujan makalah mulai mengalir dari laboratorium-laboratorium penelitian di seluruh dunia. Makalah-makalah lama yang menghimpun debu di perpustakaan tiba-tiba menjadi topik terpanas dalam fisika. Ide alam semesta paralel, yang dulunya dianggap terlampau asing untuk dianggap benar, kini menjadi pentas pusat dalam komunitas fisika, dengan ratusan konferensi dan puluhan ribu makalah dicurahkan kepada subjek ini.

(Kadang-kadang situasi tidak terkendali, ketika beberapa fisikawan mengalami "demam Nobel". Pada Agustus 1991, majalah *Discover*

bahkan memasang judul sensasional pada sampulnya: "*The New Theory of Everything: A Physicist Tackles the Ultimate Cosmic Riddle*". Artikelnya mengutip seorang fisikawan yang sedang mengejar kemahsyuran dan keagungan: "Saya bukan orang rendah hati. Jika [teori] ini bekerja, akan menghasilkan Hadiah Nobel," bualnya. Saat dihadapkan dengan kritik bahwa teori string masih dalam masa pertumbuhannya, dia menyerang balik, "Tokoh-tokoh terbesar string menyatakan bahwa diperlukan waktu empat ratus tahun untuk membuktikan string, tapi saya bilang mereka sebaiknya tutup mulut.")

Keramaian dimulai.

Akhirnya, terdapat serangan balasan terhadap "kereta musik string". Seorang fisikawan Harvard mengejek bahwa teori string sebetulnya bukan cabang fisika sama sekali, melainkan cabang matematika murni, atau filsafat, jika bukan agama. Peraih Nobel, Sheldon Glashow dari Harvard, memimpin serangan tersebut, menyamakan kereta musik superstring dengan program Star Wars (yang memakan banyak sumber daya tapi tak pernah bisa diujicoba). Glashow mengatakan dirinya sebetulnya sungguh bahagia bahwa begitu banyak fisikawan belia mengerjakan teori string, sebab, katanya, itu membuat mereka tidak mengganggu dirinya. Saat ditanya terkait komentar Witten yang menyatakan bahwa teori string akan mendominasi fisika selama 50 tahun ke depan, sebagaimana mekanika quantum mendominasi 50 tahun terakhir, dia menjawab bahwa teori string akan mendominasi fisika sebagaimana teori Kaluza-Klein (yang dia anggap "gila") mendominasi fisika selama 50 tahun terakhir,

padahal kenyataannya tidak demikian. Dia berusaha menjaga Harvard dari para teoris string. Tapi begitu generasi fisikawan berikutnya bergeser ke teori string, suara tunggal seorang peraih Nobel sekalipun segera tenggelam. (Sejak saat itu Harvard telah menggaji beberapa teoris string belia.)

Musik Kosmik

Einstein pernah mengatakan bahwa bila sebuah teori tidak menyodorkan gambaran fisikal yang bisa dipahami oleh seorang anak kecil, maka teori itu mungkin percuma. Untungnya, di belakang teori string terdapat gambaran fisikal sederhana, sebuah gambaran yang berlandaskan musik.

Menurut teori string, bila Anda mempunyai super mikroskop dan dapat mengintip jantung elektron, Anda tidak akan melihat partikel titik, melainkan string yang bervibrasi. (String tersebut amat sangat kecil, pada panjang Planck 10^{-33} cm, semiliar miliar kali lebih kecil dari proton, jadi semua partikel subatom terlihat mirip titik.) Jika kita memetik string ini, vibrasi akan berubah; elektron dapat berubah menjadi neutrino. Petik lagi, ia dapat berubah menjadi quark. Kenyataannya, bila Anda memetik cukup keras, ia bisa menjadi partikel subatom manapun yang kita kenal. Dengan ini, teori string dapat tanpa kesulitan menjelaskan mengapa terdapat begitu banyak partikel subatom. Mereka tak lain adalah "not" yang bisa dimainkan seseorang pada superstring. Sebagai analogi, pada string biola, not A tinggi atau B tinggi atau C tinggi bukanlah not dasar. Cukup dengan

cukup memetik string dengan cara berlainan, kita dapat menghasilkan semua not *scale*[15] musik. B rendah, misalnya, tidak lebih dasar dari G. Mereka semua tak lain adalah not pada senar biola. Demikian halnya, elektron dan quark tidak fundamental, tapi string-lah yang fundamental. Kenyataannya, semua subpartikel alam semesta tak lain bisa dipandang sebagai vibrasi-vibrasi berbeda string. "Harmoni" string adalah hukum fisika.

String-string bisa berinteraksi dengan berpisah dan bergabung ulang, sehingga menciptakan interaksi-interaksi yang kita saksikan di antara elektron dan proton dalam atom. Dengan cara ini, melalui teori string, kita dapat mereproduksi semua hukum fisika atom dan nuklir. "Melodi" yang tertulis pada string dapat disamakan dengan hukum kimia. Alam semesta kini bisa dipandang sebagai simfoni string raksasa.

Teori string tak hanya menerangkan partikel-partikel teori quantum sebagai not musik alam semesta, ia juga menerangkan relativitas Einstein—vibrasi terendah string, partikel 2-pusingan bermassa nol, bisa diinterpretasikan sebagai graviton, partikel atau quantum gravitasi. Jika kita mengkalkulasi interaksi graviton-graviton ini, kita persis mendapatkan teori gravitasi lama Einstein dalam bentuk quantum. Saat string bergerak, pecah, dan terbentuk ulang, itu menempatkan pembatasan sangat besar pada ruang-waktu. Ketika kita menganalisa pembatas-pembatas ini, kita lagi-lagi mendapatkan teori relativitas umum Einstein. Dengan demikian, teori string menerangkan teori Einstein secara rapi tanpa kerja tambahan. Edward Witten

[15] Set not dengan interval tetap, disusun menurut *pitch* (pola titi nada)—penj.

mengatakan bahwa seandainya Einstein tak pernah menemukan relativitas, teorinya mungkin telah ditemukan sebagai produk sampingan teori string. Relativitas umum, dalam beberapa hal, adalah cuma-cuma.

Keindahan teori string adalah bahwa ia dapat dipersamakan dengan musik. Musik menyediakan metafora yang dengannya kita bisa memahami sifat alam semesta, baik pada level subatom maupun level kosmik. Sebagaimana pemain biola kenamaan, Yehudi Menuhin, pernah menulis, "Musik menciptakan keteraturan dari kekacauan; sebab ritme memaksakan kebulatan suara kepada hal yang berlainan; melodi memaksakan kesinambungan kepada hal yang berputusan; dan harmoni memaksakan kecocokan kepada hal yang tidak cocok."

Einstein menulis bahwa pencarian *unified field theory* akan memungkinkan dirinya "membaca Pikiran Tuhan". Jika teori string benar, kita sekarang melihat bahwa Pikiran Tuhan melambangkan musik kosmik yang bergaung di *hyperspace* sepuluh-dimensi. Sebagaimana Gottfried Leibniz pernah bilang, "Musik adalah latihan aritmetika tersembunyi sebuah jiwa yang tak sadar bahwa dirinya sedang menghitung."

Secara historis, jalinan antara musik dan sains ditempa seawalnya pada abad ke-5 SM, saat pengikut Pythagoras dari Yunani menemukan hukum harmoni dan mereduksinya menjadi matematika. Mereka menemukan bahwa nada string *lyre*[16] yang dipetik sesuai dengan panjangnya. Bila seseorang menggandakan panjang string *lyre*, maka not-nya turun sebanyak satu oktaf penuh. Jika panjang string

[16] Instrumen string kuno berbentuk U—penj.

dikurangi dua pertiganya, maka nada berubah sebanyak seperlima. Oleh karena itu, hukum musik dan harmoni bisa direduksi menjadi hubungan akurat antara bilangan-bilangan. Tak heran, moto pengikut Pythagoras adalah "Segala sesuatu adalah bilangan". Mulanya, mereka begitu senang dengan temuan ini sampai-sampai mereka berani menerapkan hukum harmoni ini pada seluruh alam semesta. Upaya mereka gagal lantaran kompleksitas materi yang sangat besar. Namun, sedikit banyak, dengan teori string, fisikawan sedang kembali ke impian pengikut Pythagoras.

Mengomentari jalinan bersejarah ini, Jamie James pernah berkata, "Musik dan sains [dahulu] diidentifikasi secara begitu mendalam sampai-sampai seseorang yang menyatakan bahwa terdapat perbedaan esensial antara mereka akan dianggap sebagai orang bodoh, [tapi kini] seseorang yang mengajukan bahwa mereka mempunyai persamaan akan menanggung resiko dianggap musuh oleh satu kelompok dan peminat amatir oleh kelompok lain—dan, yang paling celaka, pempopuler oleh kedua kelompok."

Persoalan Hyperspace

Bila dimensi lebih tinggi betul-betul eksis di alam dan tak hanya dalam matematika semata, maka teoris string harus menghadapi persoalan yang merundung Theodr Kaluza dan Felix Klein pada 1921 silam ketika mereka merumuskan teori dimensi tinggi pertama: di manakah dimensi-dimensi lebih tinggi ini berada?

Kaluza, matematikawan yang sebelumnya tak dikenal, menulis

sebuah surat kepada Einstein, mengajukan untuk merumuskan persamaan Einstein di lima dimensi (satu dimensi waktu dan empat dimensi ruang). Secara matematis, ini tidak masalah, sebab persamaan Einstein dapat ditulis di dimensi mana pun. Tapi surat itu memuat observasi mengagetkan: bila seseorang memisahkan secara manual bagian-bagian empat dimensi yang terkandung dalam persamaan lima-dimensi tersebut, Anda akan secara otomatis mendapatkan, hampir seperti sulap, teori cahaya Maxwell! Dengan kata lain, teori gaya elektromagnet Maxwell jatuh tepat dari persamaan gravitasi Einstein jika kita cukup menambahkan dimensi kelima. Walaupun kita tidak bisa melihat dimensi kelima, riak-riak dapat terbentuk pada dimensi kelima, yang disamakan dengan gelombang cahaya! Ini merupakan temuan menyenangkan, sebab bergenerasi-generasi fisikawan dan insinyur telah harus menghafalkan persamaan Maxwell yang sulit selama 150 tahun terakhir. Kini, persamaan rumit ini muncul, tanpa diupayakan, sebagai vibrasi paling sederhana yang bisa ditemukan seseorang di dimensi kelima.

Bayangkan ikan-ikan yang berenang di kolam dangkal, persis di bawah daun bunga teratai, anggap "alam semesta" mereka hanya dua-dimensi. Dunia tiga-dimensi kita mungkin di luar pengetahuan mereka. Tapi terdapat satu cara agar mereka bisa mendeteksi kehadiran dimensi ketiga. Bila hujan turun, mereka bisa melihat jelas bayangan riak-riak yang menempuh sepanjang permukaan kolam. Demikian halnya, kita tidak bisa melihat dimensi kelima, tapi riak-riak di dimensi kelima terlihat oleh kita sebagai cahaya.

(Teori Kaluza merupakan penyingkapan menawan dan mendalam mengenai kekuatan kesimetrian. Berikutnya ditunjukkan bahwa bila kita menambahkan lebih banyak dimensi lagi pada teori Einstein dan membuat mereka bervibrasi, maka vibrasi-vibrasi dimensi lebih tinggi ini akan mereproduksi boson W, boson Z, dan gluon yang kita temukan dalam gaya nuklir lemah dan kuat! Jika program yang dianjurkan oleh Kaluza ini benar, maka alam semesta rupanya jauh lebih sederhana dari yang dipikirkan sebelumnya. Dimensi-dimensi tinggi yang bervibrasi mereproduksi banyak gaya yang mengatur dunia.)

Walaupun Einstein terkejut oleh temuan ini, itu terlalu bagus untuk dianggap benar. Selama bertahun-tahun, ditemukan persoalan-persoalan yang membuat ide Kaluza menjadi tak berguna. Pertama, teori tersebut dipenuhi dengan divergensi dan anomali, yang merupakan karakter teori gravitasi quantum. Kedua, ada jauh lebih banyak pertanyaan fisika yang menggelisahkan: mengapa kita tak melihat dimensi kelima? Ketika kita menembakkan anak panah ke langit, kita tidak melihatnya lenyap ke dimensi lain. Pikirkan asap, yang secara perlahan merembesi setiap kawasan ruang. Karena asap tak pernah teramati menghilang ke dimensi lebih tinggi, fisikawan menyadari bahwa dimensi tinggi, jika betul-betul eksis, harus lebih kecil daripada atom. Selama seabad yang lalu, penganut mistik dan matematikawan mempunyai ide dimensi tinggi, tapi fisikawan mengejek ide tersebut, karena tidak ada yang pernah melihat objek-objek memasuki dimensi lebih tinggi.

Untuk menyelamatkan teori ini, fisikawan harus mengajukan bahwa dimensi-dimensi tinggi ini begitu kecil sehingga tidak dapat diamati di alam. Karena dunia kita merupakan dunia empat-dimensi, berarti dimensi kelima harus digulung menjadi lingkaran amat kecil yang lebih kecil dari sebuah atom, terlampau kecil untuk diamati oleh eksperimen.

Teori string harus menghadapi persoalan ini juga. Kita harus menggulung dimensi-dimensi tinggi yang tak dikehendaki ini menjadi bola amat kecil (sebuah proses yang disebut *compactification*). Menurut teori string, alam semesta awalnya adalah sepuluh-dimensi, dengan semua gaya yang disatukan oleh string. Namun, *hyperspace* sepuluh-dimensi tersebut tidak stabil, dan enam dari sepuluh dimensi itu mulai menggulung menjadi bola kecil, menyisakan empat dimensi lain yang mengembang ke luar dalam *big bang*. Alasan mengapa kita tidak bisa melihat dimensi-dimensi ini adalah bahwa mereka jauh lebih kecil dari sebuah atom, dan karenanya tak ada sesuatu yang bisa masuk ke dalamnya. (Contoh, pipa air taman dan sedotan, dari jauh, terlihat sebagai objek satu-dimensi yang ditetapkan oleh panjang mereka. Tapi bila seseorang memeriksa mereka secara teliti, dia akan menemukan bahwa mereka sebetulnya adalah permukaan dua dimensi atau silinder, tapi dimensi kedua telah menggulung sehingga seseorang tidak melihatnya.)

Mengapa String?

Walaupun upaya-upaya terdahulu dalam *unified field theory* telah

gagal, teori string bertahan terhadap semua tantangan. Kenyataannya, ia tak punya pesaing. Ada dua alasan mengapa teori string berhasil sementara banyak teori lain telah gagal.

Pertama, sebagai teori yang didasarkan pada objek luas (string), ia menghindari banyak divergensi yang diasosiasikan dengan partikel titik. Sebagaimana Newton amati, gaya gravitasi di sekitar partikel titik menjadi tak terhingga saat kita mendekatinya. (Dalam hukum kuadrat terbalik milik Newton yang terkenal, gaya gravitasi bertambah sebesar $1/r^2$, sehingga melonjak sampai tak terhingga saat kita mendekati partikel titik—yakni, saat r menjadi nol, gaya gravitasi bertambah sebesar 1/0, yang mana tak terhingga).

Dalam teori quantum pun, gaya ini tetap tak terhingga saat kita mendekati sebuah partikel titik quantum. Selama berdekade-dekade, serangkaian aturan misterius telah ditemukan oleh Feynman dan yang lain untuk menyembunyikan tipe divergensi ini dan banyak tipe lainnya. Tapi untuk teori gravitasi quantum, kantong trik yang dipikirkan oleh Feynman pun tidak cukup untuk menyingkirkan ketakterhinggaan tersebut dalam teori ini. Persoalannya adalah bahwa partikel-partikel titik berukuran kecil tak terhingga, artinya gaya dan energi mereka berpotensi tak terhingga.

Tapi ketika kita menganalisa teori string secara teliti, kita menemukan dua mekanisme yang dapat melenyapkan divergensi-divergensi ini. Mekanisme pertama adalah melalui topologi string; mekanisme kedua, melalui kesimetriannya, disebut supersimetri.

Topologi teori string berbeda sama sekali dari topologi partikel titik,

dan karenanya divergensinya jauh berbeda. (Kasarnya, karena string mempunyai panjang terhingga, artinya gaya-gaya tidak melonjak sampai tak terhingga saat kita mendekati string. Dekat string, gaya-gaya hanya bertambah sebesar $1/L^2$, di mana L adalah panjang string, yang berada dalam urutan panjang Planck 10^{-33} cm. Panjang L ini bertindak sebagai pemutus divergensi.) Karena string bukan partikel titik tapi mempunyai ukuran definitif, seseorang bisa menunjukkan bahwa divergensinya "melengket" di sepanjang string, dan oleh sebab itu semua kuantitas fisikal menjadi terhingga.

Walaupun secara intuisi cukup jelas bahwa divergensi teori string melengket dan terhingga, ekspresi matematis yang tepat atas fakta ini sungguh sukar dan diberikan oleh "fungsi modular elips" (*elliptic modular function*), salah satu fungsi teraneh dalam matematika, dengan sejarah mempesona di mana ia memainkan peran kunci dalam sebuah film Hollywood. *Good Will Hunting* adalah kisah tentang seorang anak kelas pekerja kasar dari gang-gang Cambridge, diperankan oleh Matt Damon, yang mempertontonkan kemampuan matematika yang mengejutkan. Ketika tidak sedang ikut dalam baku hantam dengan para penjahat sekitar, dia bekerja sebagai penjaga pintu di MIT. Para profesor di MIT terkejut mendapati bahwa penjahat jalanan ini sebetulnya merupakan jenius matematika yang sanggup menuliskan jawaban untuk persoalan matematika yang nampak sulit. Sadar bahwa penjahat jalanan ini telah mempelajari matematika rumit sendirian, salah satu dari mereka berseloroh bahwa dia adalah "Ramanujan berikutnya".

Faktanya, *Good Will Hunting* didasarkan pada kehidupan Srinivasa Ramanujan, jenius matematika terhebat abad 20, seorang pria yang tumbuh besar dalam kemiskinan dan keterpencilan dekat Madras, India, di pergantian abad lalu. Hidup dalam keterpencilan, dia harus memperoleh banyak matematika Eropa 19 sendirian. Karirnya seperti supernova, menerangi angkasa secara singkat dengan kebrilianan dalam matematika. Tragisnya, dia meninggal akibat tuberkulosis pada 1920 di usia 37 tahun. Seperti Matt Damon dalam *Good Will Hunting*, dia memimpikan persamaan matematika, dalam hal ini fungsi modular elips, yang memiliki atribut matematis aneh namun indah, tapi hanya di 24 dimensi. Para matematikawan masih mencoba menguraikan "buku catatan Ramanujan yang hilang" yang ditemukan setelah kematiannya. Meninjau kembali kerja Ramanujan, kita melihat bahwa itu bisa digeneralisir menjadi delapan dimensi, yang langsung dapat diterapkan pada teori string. Fisikawan menambahkan dua dimensi tambahan dalam rangka menyusun teori fisika. (Contoh, kacamata yang terpolarisasi memanfaatkan fakta bahwa cahaya mempunyai dua polarisasi fisik; cahaya bisa bervibrasi ke kiri-ke kanan atau ke atas-ke bawah. Tapi rumusan matematis cahaya dalam persamaan Maxwell diberikan dengan empat komponen. Dua dari empat vibrasi ini sebetulnya redundan/kebanyakan.) Ketika kita menambahkan dua dimensi lagi pada fungsi Ramanujan, "bilangan ajaib" matematika menjadi 10 dan 26, persis sama dengan "bilangan ajaib" teori string. Jadi sedikit banyak, Ramanujan mengerjakan teori string sebelum Perang Dunia I!

Atribut luar biasa fungsi modular elips ini menjelaskan mengapa teori tersebut harus eksis di sepuluh dimensi. Hanya dengan jumlah dimensi tersebut sebagian besar divergensi yang mengganggu teori-teori lain lenyap, seolah-olah akibat sulap. Tapi topologi string sendiri tidak cukup mumpuni untuk melenyapkan seluruh divergensi. Divergensi yang tersisa dalam teori ini disingkirkan oleh fitur kedua teori string, kesimetriannya.

Supersimetri

String mempunyai beberapa dari kesimetrian terbesar yang dikenal sains. Di bab 4, dalam pembahasan inflasi dan Standard Model, kita melihat bahwa kesimetrian memberi kita cara menawan untuk menyusun partikel-partikel subatom ke dalam pola-pola menyenangkan dan elegan. Tiga tipe quark bisa disusun menurut kesimetrian $SU(3)$, yang menukar tempat ketiga quark dengan satu sama lain. Dipercaya bahwa dalam teori GUT, lima tipe quark dan lepton bisa disusun menurut kesimetrian $SU(5)$.

Dalam teori string, kesimetrian ini menghapuskan divergensi dan anomali yang tersisa. Karena kesimetrian termasuk ke dalam perkakas paling menawan dan mumpuni yang tersedia bagi kita, seseorang mungkin berharap bahwa teori alam semesta harus memiliki kesimetrian paling elegan dan mumpuni yang dikenal oleh sains. Pilihan logisnya adalah kesimetrian yang tak hanya menukar tempat quark, tapi semua partikel yang dijumpai di alam—yakni, persamaan yang tetap sama jika kita merombak susunan semua partikel subatom.

Ini persis menggambarkan kesimetrian superstring, yang disebut supersimetri. *Ini adalah satu-satunya kesimetrian yang saling menukar tempat semua partikel subatom yang dikenal fisika.* Ini menjadikannya ideal untuk kesimetrian yang menyusun semua partikel alam semesta ke dalam kesatuan tunggal, elegan, dan menyatu.

Jika kita memperhatikan gaya-gaya dan partikel-partikel alam semesta, semuanya jatuh ke dalam dua kategori: "fermion" dan "boson", tergantung pusingan mereka. Mereka bertindak seperti gasing berputar yang bisa berputar dengan laju beraneka ragam. Contoh, foton, partikel cahaya yang memediasi gaya elektromagnet, mempunyai 1 pusingan. Gaya nuklir lemah dan kuat dimediasi oleh boson W dan gluon, yang juga mempunyai 1 pusingan. Graviton, partikel gravitasi, mempunyai 2 pusingan. Semua yang berpusingan bulat ini disebut boson. Demikian halnya, partikel-partikel materi diterangkan oleh partikel subatom berpusingan setengah-bulat—1/2, 3/2, 5/2, dan seterusnya. (Partikel-partikel berpusingan setengah-bulat disebut fermion dan mencakup elektron, neutrino, dan quark.) Dengan demikian, supersimetri secara elegan melambangkan dualitas di antara boson dan fermion, di antara gaya dan materi.

Dalam teori supersimetri, semua partikel subatom mempunyai partner: setiap fermion berpasangan dengan boson. Walaupun kita belum pernah melihat partner-partner supersimetri ini di alam, fisikawan telah menamai partner elektron sebagai "selektron", dengan 0 pusingan. (Fisikawan menambahkan "s" untuk menerangkan superpartner sebuah partikel.) Interaksi [nuklir] lemah meliputi

partikel-partikel yang disebut lepton; superpartnernya disebut slepton. Demikian pula, quark mempunyai partner berpusingan 0 yang disebut squark. Secara umum, partner partikel-partikel yang dikenal (quark, lepton, graviton, foton, dan seterusnya) disebut spartikel, atau superpartikel. Spartikel ini masih harus ditemukan di pemecah atom kita (mungkin karena mesin-mesin kita tidak cukup canggih untuk menciptakan mereka).

Tapi karena semua partikel subatom merupakan fermion atau boson, teori supersimetri memiliki potensi menyatukan semua partikel subatom yang dikenal ke dalam satu kesimetrian sederhana. *Kita sekarang mempunyai kesimetrian yang cukup besar untuk mencakup seluruh alam semesta.*

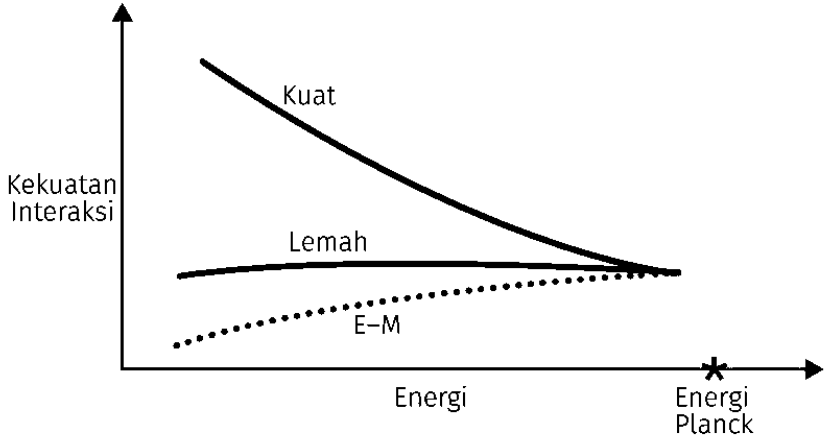
Bayangkan sebuah kepingan salju. Katakanlah tiap-tiap dari enam gigi kepingan salju tersebut melambangkan partikel subatom, di mana satu sebagai boson dan satu sebagai fermion, berselang-seling. Keindahan "super kepingan salju" ini adalah bahwa manakala kita memutarnya, ia tetap sama. Dengan cara ini, super kepingan salju menyatukan semua partikel dan spartikel mereka. Jadi jika kita hendak mencoba menyusun *unified field theory* hipotetis dengan enam partikel saja, kandidat alaminya adalah super kepingan salju.

Supersimetri membantu melenyapkan ketakterhinggaan yang tersisa yang fatal bagi teori-teori lain. Kita di awal menyebutkan bahwa sebagian besar divergensi lenyap berkat topologi string—yakni, karena string mempunyai panjang terhingga, gaya-gaya tidak melonjak sampai tak terhingga saat kita mendekatinya. Ketika kita

memeriksa divergensi yang tersisa, kita mendapati bahwa mereka ada dua jenis, dari interaksi boson dan fermion. Namun, dua kontribusi ini selalu terjadi dengan tanda berlawanan, karenanya kontribusi boson tepat menghapus kontribusi fermion! Dengan kata lain, karena kontribusi fermion dan boson selalu mempunyai tanda berlawanan, ketakterhinggaan yang tersisa dalam teori ini menghapus satu sama lain. Jadi supersimetri lebih dari sekadar hiasan; ia bukan semata-mata merupakan kesimetrian estetis dan menyenangkan lantaran menyatukan semua partikel alam, tapi ia juga esensial dalam menghapuskan divergensi string teori.

Ingat kembali analogi perancangan roket licin, di mana vibrasi pada sayap pada akhirnya bisa bertambah dan melepas sayap. Solusinya adalah mengeksploitasi kekuatan kesimetrian, merancang ulang sayap agar vibrasi di satu sayap menghapus vibrasi di sayap lain. Ketika satu sayap bervibrasi menurut arah jarum jam, sayap lain bervibrasi menurut arah jarum jam berlawanan, menghapuskan vibrasi pertama. Dengan demikian, kesimetrian roket, lebih dari sekadar sebagai perangkat artifisial dan artistik, sangat krusial dalam menghapus dan menyeimbangkan tekanan terhadap sayap. Demikian halnya, supersimetri menghapus divergensi dengan mengimbangkan bagian boson dan fermion terhadap satu sama lain.

(Supersimetri juga memecahkan serangkaian persoalan sangat teknis yang betul-betul fatal bagi teori GUT. Inkonsistensi matematis ruwet dalam teori GUT memerlukan supersimetri untuk melenyap-kannya.)



Gambar 10: Kekuatan gaya nuklir lemah, gaya nuklir kuat, dan gaya elektromagnet sungguh berlainan di dunia keseharian kita. Namun, pada energi yang dijumpai dekat *big bang*, kekuatan gaya-gaya ini semestinya berkonvergensi sempurna. Konvergensi ini terjadi bila kita memiliki teori supersimetri. Dengan demikian, supersimetri mungkin merupakan elemen kunci dalam *unified field theory*.

Walaupun supersimetri melambangkan ide luar biasa, saat ini sama sekali tidak ada bukti eksperimen yang mendukungnya. Ini mungkin karena superpartner elektron dan proton yang familiar terlampau masif untuk diproduksi dalam akselerator partikel masa kini. Namun, terdapat satu kepingan bukti menggiurkan yang menunjukkan jalan ke supersimetri. Kita sekarang tahu bahwa kekuatan tiga gaya quantum sungguh berlainan. Kenyataannya, pada energi rendah, gaya nuklir kuat adalah 30 kali lebih kuat dari gaya nuklir lemah, dan seratusan kali lebih kuat dari gaya elektromagnet. Namun, kasusnya tidak selalu demikian. Pada jenak *big bang*, kita menduga ketiga gaya ini berkekuatan setara. Bekerja ke belakang, fisikawan dapat

mengkalkulasi berapa kekuatan ketiga gaya di permulaan masa. Dengan menganalisa Standard Model, fisikawan menemukan bahwa kekuatan ketiga gaya berkonvergensi/bertemu dekat *big bang*. Tapi mereka tidak persis setara. Namun manakala seseorang menambahkan supersimetri, ketiga gaya cocok sempurna dan memiliki kekuatan setara, persis dengan yang pasti dinyatakan sebuah *unified field theory*. Walaupun ini bukan bukti langsung supersimetri, setidaknya menunjukkan bahwa supersimetri konsisten dengan fisika yang kita kenal.

Mendapatkan Standard Model

Walaupun superstring tidak memiliki parameter yang bisa disetel-setel sama sekali, teori string dapat menawarkan solusi yang secara mengagumkan dekat dengan Standard Model, dengan kumpulan partikel subatom aneh dan 19 parameter bebasnya (seperti massa partikel dan kekuatan keberpasangan mereka) yang beraneka warna. Dan lagi, Standard Model mempunyai tiga salinan quark dan lepton yang identik dan redundan, yang kelihatannya sama sekali tak berguna. Untungnya, teori string bisa mendapat banyak fitur kualitatif Standard Model tanpa kesulitan. Seperti mendapat sesuatu tanpa melakukan sesuatu. Pada 1984, Philip Candelas dari Universitas Texas, Gary Horowitz dan Andrew Strominger dari Universitas California di Santa Barbara, dan Edward Witten menunjukkan bahwa bila Anda membungkus enam dari sepuluh dimensi teori string dan masih mempertahankan supersimetri pada empat dimensi yang tersisa,

dunia kecil 6-dimensi itu bisa diterangkan oleh apa yang matematikawan sebut sebagai manifold Calabi-Yau. Dengan melakukan beberapa pemilihan sederhana atas ruang-ruang Calabi, mereka menunjukkan bahwa kesimetrian string dapat runtuh menjadi sebuah teori yang luar biasa dekat dengan Standard Model.

Dengan cara ini, teori string memberi kita jawaban sederhana tentang mengapa Standard Model memiliki tiga generasi yang redundan. Dalam teori string, jumlah generasi atau redundansi dalam model quark terkait dengan jumlah "lubang" yang kita miliki pada manifold Calabi-Yau. (Contoh, donat, pipa sebelah dalam, dan cangkir kopi, semuanya merupakan permukaan dengan satu lubang. Bingkai kacamata mempunyai dua lubang. Permukaan Calabi-Yau bisa memiliki jumlah lubang yang acak.) Jadi, cukup dengan memilih manifold Calabi-Yau yang memiliki jumlah lubang tertentu, kita bisa menyusun Standard Model dengan generasi quark redundan berbeda-beda. (Karena kita tidak pernah melihat ruang Calabi-Yau lantaran begitu kecil, kita juga tidak pernah melihat fakta bahwa ruang ini mempunyai lubang donat.) Bertahun-tahun, tim-tim fisikawan telah bersusah payah mencoba mengkatalogkan semua kemungkinan ruang Calabi-Yau, sadar bahwa topologi ruang 6-dimensi ini menentukan quark dan lepton alam semesta 4-dimensi kita.

Teori-M

Kegemparan seputar teori string yang timbul pada 1984 tidak bisa berlangsung selamanya. Pada pertengahan 1990-an, kereta musik

superstring lambat laun kehilangan tenaga di antara para ilmuwan. Persoalan-persoalan mudah yang dikemukakan oleh teori ini dipetik satu per satu, menyisakan persoalan sulit. Salah satu persoalan sulit itu adalah bahwa miliaran solusi persamaan string telah ditemukan. Dengan mengkompaktifikasi atau menggulung ruang-waktu dengan cara berbeda-beda, solusi string dapat dituliskan di dimensi mana pun, tidak hanya empat. Masing-masing dari miliaran solusi string tersebut ekuivalen dengan alam semesta yang konsisten secara matematis.

Fisikawan tiba-tiba tenggelam dalam solusi string. Yang luar biasa, banyak dari solusi itu yang terlihat sangat mirip dengan alam semesta kita. Dengan pemilihan ruang Calabi-Yau yang sesuai, adalah relatif mudah untuk mereproduksi banyak fitur mencolok Standard Model, dengan kumpulan quark dan leptonnya yang aneh, bahkan dengan set salinan redundannya yang mengherankan. Namun sulit sekali (dan tetap menjadi tantangan bahkan hingga hari ini) untuk mendapatkan Standard Model yang persis sama, dengan harga kesembilan belas parameternya yang spesifik serta tiga generasi redundan. (Jumlah solusi string yang membingungkan sebetulnya disambut oleh fisikawan yang mempercayai ide multiverse, karena tiap-tiap solusi mewakili alam semesta paralel yang konsisten sepenuhnya. Tapi adalah sangat menyengsarakan ketika ilmuwan mendapat masalah dalam menemukan alam semesta kita sendiri di antara belantara alam semesta ini.)

Alasan mengapa ini begitu sulit adalah bahwa seseorang pada akhirnya harus merusak supersimetri, karena kita tidak melihat

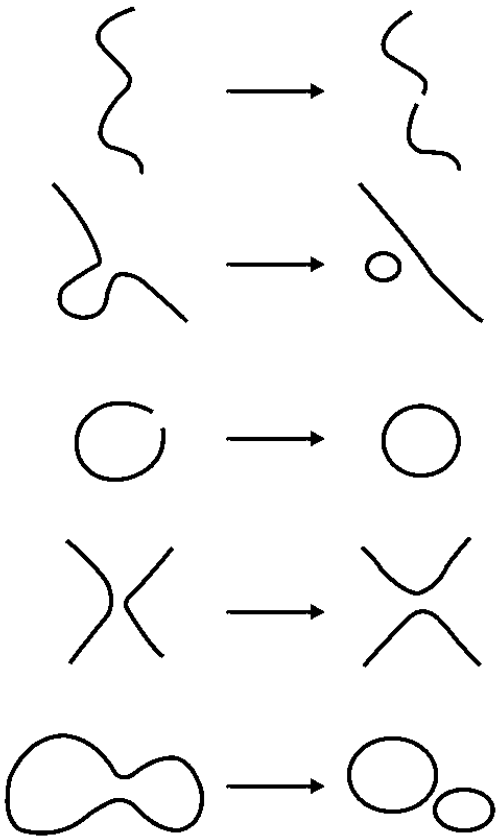
supersimetri di dunia *low-energy* kita. Di alam, misalnya, kita tidak melihat selektron, superpartner elektron. Jika supersimetri tidak rusak, maka massa tiap partikel semestinya setara dengan massa superpartikelnya. Fisikawan percaya supersimetri telah rusak, dengan temuan bahwa massa superpartikel-superpartikel adalah besar, di luar jangkauan akselerator partikel mutakhir. Tapi saat ini tak ada seorang pun yang menghasilkan mekanisme kredibel untuk merusak supersimetri.

David Gross dari Kavli Institute for Theoretical Physics di Santa Barbara mengemukakan bahwa terdapat jutaan solusi untuk teori string di tiga dimensi ruang, yang mana sedikit membebani karena tidak ada cara bagus untuk memilih di antara mereka.

Ada pertanyaan-pertanyaan bandel lain. Salah satu yang paling membebani adalah fakta bahwa terdapat lima teori string konsisten. Sulit sekali membayangkan bahwa alam semesta bisa mentoleransi lima *unified field theory* berbeda. Einstein percaya bahwa Tuhan tidak mempunyai pilihan dalam menciptakan alam semesta, lalu mengapa Tuhan mesti menciptakan yang lima itu?

Teori asli yang didasarkan pada rumusan Veneziano menerangkan apa yang disebut teori superstring tipe I. Teori tipe I didasarkan pada string terbuka (string dengan dua ujung) dan juga string tertutup (string sirkuler). Ini merupakan teori yang paling intens dipelajari di awal 1970-an. (Menggunakan teori string medan, Kikkawa dan saya sanggup mengkatalogkan set lengkap interaksi string tipe I. Kami menunjukkan bahwa string tipe I membutuhkan lima interaksi; untuk

string tertutup, kami menunjukkan bahwa hanya satu suku interaksi yang dibutuhkan.)



Gambar 11: String tipe I menjalani lima kemungkinan interaksi, di mana string bisa putus [1], berjalin [3], dan memisah [2]. Untuk string tertutup, hanya interaksi terakhir yang mungkin (menyerupai mitosis sel-sel).

Kikkawa dan saya menunjukkan pula bahwa penyusunan teori-teori konsisten sepenuhnya dengan string tertutup saja (yang menyerupai simpal) bisa dilakukan. Hari ini, teori ini disebut teori

string tipe II, di mana string-string berinteraksi lewat pencubitan sebuah string sirkuler menjadi dua string kecil (menyerupai mitosis sel).

Teori string yang paling realistik disebut *heterotic string*, dirumuskan oleh kelompok Princeton (meliputi David Gross, Emil Martinec, Ryan Rohm, dan Jeffrey Harvey). String-string heterotik bisa mengakomodasi kelompok kesimetrian yang disebut E(8) × E(8) atau $O(32)$, yang cukup besar untuk menelan teori-teori GUT. String heterotik didasarkan sepenuhnya pada string-string tertutup. Pada 1980-an dan 1990-an, ketika menyebutkan superstring, para ilmuwan merujuk pada string heterotik, sebab ia cukup kaya untuk memungkinkan seseorang menganalisa Standard Model dan teori GUT. Kelompok kesimetrian E(8) × E(8), misalnya, bisa diturunkan menjadi E(8), kemudian E(6), yang cukup besar untuk mencakup kesimetrian $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ Standard Model.

Misteri Supergravitasi

Di samping lima teori superstring, terdapat pertanyaan bandel lain yang telah dilupakan dalam kesibukan memecahkan teori string. Pada 1967, tiga fisikawan, Peter Van Nieuwenhuizen, Sergio Ferrara, dan Daniel Freedman, kala itu bekerja di State University of New York di Stony Brook, menemukan bahwa teori gravitasi asli Einstein bisa supersimetris jika seseorang memperkenalkan satu medan baru saja, superpartner medan gravitasi (disebut gravitino, yang berarti "graviton kecil", dengan pusingan 3/2). Teori baru ini disebut

supergravitasi, dan ia didasarkan pada partikel titik, bukan string. Tak seperti superstring, dengan deretan not dan resonansinya yang tak terhingga, supergravitasi mempunyai dua partikel saja. Pada 1978, ditunjukkan oleh Eugene Cremmer, Joël Scherk, dan Bernard Julia dari École Normale Supérieure bahwa supergravitasi paling umum bisa dituliskan di sebelas dimensi. (Jika kita mencoba menuliskan teori supergravitasi di dua belas atau tiga belas dimensi, akan timbul inkonsistensi matematis.) Pada akhir 1970-an dan awal 1980-an, diyakini bahwa supergravitasi mungkin adalah *unified field theory* yang banyak diceritakan itu. Teori supergravitasi ini bahkan meng-inspirasi Stephen Hawking untuk menyatakan, ketika memberikan kuliah pelantikan di atas Lucasian Chair of Mathematics di Cambridge University (kursi yang sama yang pernah diduduki oleh Isaac Newton), bahwa "akhir fisika teoritis" sudah dekat. Tapi supergravitasi segera menemui persoalan sulit yang sama yang telah mematikan teori-teori terdahulu. Walaupun memiliki ketakterhinggaan yang lebih sedikit daripada teori medan biasa, menurut analisis terakhir supergravitasi adalah tidak terhingga dan berpotensi dipenuhi anomali. Seperti semua teori medan lainnya (kecuali untuk teori string), itu membesar di hadapan para ilmuwan.

Teori supersimetri lain yang dapat eksis di sebelas dimensi adalah teori supermembran. Walaupun string hanya memiliki satu dimensi yang menetapkan panjangnya, supermembran bisa memiliki dua dimensi atau lebih karena ia melambangkan sebuah permukaan. Yang luar biasa, ditunjukkan bahwa dua tipe membran (bran-dua dan bran-

lima) konsisten juga di sebelas dimensi.

Namun, supermembran mempunyai persoalan pula; mereka terkenal sulit dikerjakan, dan teori quantum mereka betul-betul berdivergensi. Sementara senar-senar biola begitu sederhana sehingga para pengikut Pythagoras dari Yunani menyusun hukum harmoni mereka 2.000 tahun silam, membran-membran begitu sulit sampai-sampai hingga hari ini pun tak ada yang mempunyai teori musik memuaskan berdasarkan membran. Plus, ditunjukkan bahwa membran-membran ini tak stabil dan akhirnya meluruh menjadi partikel titik.

Jadi pada pertengahan 1990-an, fisikawan mempunyai beberapa misteri. Mengapa terdapat lima teori string di sepuluh dimensi? Dan mengapa terdapat dua teori di sebelas dimensi, supergravitasi dan supermembran? Selain itu, semuanya mempunyai supersimetri.

Dimensi Kesebelas

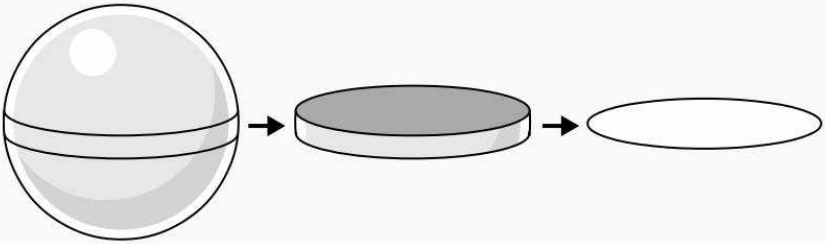
Pada 1994, sebuah kejutan datang. Terjadi terobosan lain yang sekali lagi mengubah seluruh lanskap. Edward Witten dan Paul Townsend dari Universitas Cambridge menemukan secara matematis bahwa teori string sepuluh-dimensi sebetulnya merupakan penaksiran terhadap sebuah teori sebelas-dimensi yang lebih tinggi dan misterius dengan pangkal tak diketahui. Witten, contohnya, menunjukkan bahwa bila kita mempergunakan sebuah teori mirip membran di sebelas dimensi dan menggulung satu dimensi, maka ia menjadi teori string tipe IIa sepuluh-dimensi!

Tak lama sesudah itu, ditemukan bahwa kelima teori string bisa ditunjukkan hasil yang sama—hanya perbedaan penaksiran atas teori misterius sebelas-dimensi yang sama. Karena jenis membran berbeda-beda dapat eksis di sebelas dimensi, Witten menyebut teori baru ini sebagai teori-M. Tapi teori ini tak hanya menyatukan lima teori string berlainan, sebagai tambahan ia juga menerangkan misteri supergravitasi.

Supergravitasi, jika Anda ingat kembali, adalah teori sebelas-dimensi yang hanya mengandung dua partikel bermassa nol, graviton Einstein, plus partner supersimetrinya (disebut gravitino). Sedangkan, teori-M memiliki partikel bermassa berbeda-beda dalam jumlah tak terhingga (ekuivalen dengan vibrasi tak terhingga yang bisa berdesir di suatu macam membran sebelas-dimensi). Tapi teori-M dapat menerangkan eksistensi gravitasi jika kita berasumsi bahwa seporsi kecil teori-M (partikel tak bermassa) adalah teori supergravitasi lama. Dengan kata lain, teori supergravitasi merupakan subset kecil teori-M. Demikian halnya, jika kita mempergunakan teori mirip membran sebelas-dimensi yang misterius ini dan menggulung satu dimensi, membran berubah menjadi string. Kenyataannya, ia persis berubah menjadi teori string tipe II! Contoh, jika kita mempertimbangkan bola di sebelas dimensi dan kemudian menggulung satu dimensi, bola kolaps, dan khatulistiwanya menjadi string tertutup. Kita melihat bahwa teori string dapat dipandang sebagai irisan membran di sebelas dimensi jika kita menggulung dimensi kesebelas menjadi lingkaran kecil.

Dengan demikian, kita menemukan sebuah cara menawan dan sederhana untuk menyatukan fisika sepuluh-dimensi dan sebelas-dimensi ke dalam satu teori! Sebuah prestasi luar biasa yang konseptual.

Saya masih ingat keguncangan yang dihasilkan oleh penemuan eksplosif ini. Pada waktu itu saya sedang memberikan ceramah di Universitas Cambridge. Paul Townsend cukup ramah memperkenalkan saya kepada hadirin. Tapi sebelum ceramah saya, dia menjelaskan penemuan baru ini dengan heboh, bahwa di dimensi kesebelas, berbagai teori string bisa dipersatukan menjadi teori tunggal. Judul ceramah saya menyebutkan dimensi kesepuluh. Dia bilang pada saya sebelum saya ceramah bahwa, jika ini terbukti berhasil, maka judul ceramah saya akan usang.



Gambar 12: String sepuluh-dimensi bisa muncul dari membran sebelas-dimensi dengan mengiris atau menggulung satu dimensi. Khatulistiwa membran menjadi string setelah satu dimensi kolaps. Terdapat lima cara di mana reduksi ini bisa terjadi, melahirkan lima teori superstring berlainan di sepuluh dimensi.

Saya diam-diam berpikir, "Ah." Dia marah sekali, atau, kalau tidak, komunitas fisika akan terjungkir balik sepenuhnya.

Saya tidak percaya apa yang saya dengar, jadi saya memberondong

dia dengan pertanyaan. Saya terangkan bahwa supermembran sebelas-dimensi, sebuah teori yang dia bantu rumuskan, adalah sia-sia, sebab secara matematis sulit, dan yang lebih buruk lagi, tidak stabil. Dia mengakui persoalan ini, tapi dia percaya diri bahwa pertanyaan-pertanyaan ini akan terpecahkan di masa mendatang.

Saya juga mengatakan bahwa supergravitasi sebelas-dimensi adalah tidak terhingga; membesar seperti semua teori lain, kecuali teori string. Itu bukan lagi persoalan, jawabnya tenang, karena supergravitasi tak lain hanyalah penaksiran atas teori lebih besar yang masih misterius, teori-M, yang *memang* terhingga—ini sebetulnya merupakan teori string yang dirumuskan ulang di dimensi kesebelas dari segi membran.

Lalu saya katakan bahwa supermembran tidak bisa diterima karena tak ada yang pernah sanggup menjelaskan bagaimana membran-membran berinteraksi sewaktu bertubrukan dan membentuk ulang (sebagaimana yang telah saya lakukan dalam tesis Ph.D. saya bertahun-tahun silam untuk teori string). Dia mengakui persoalan ini, tapi dia yakin, juga, ini bisa dipecahkan.

Terakhir, saya bilang bahwa teori-M bukan betul-betul teori sama sekali, karena persamaan dasarnya tidak diketahui. Tak seperti teori string (yang dapat diekspresikan dari segi persamaan string medan sederhana, yang saya tuliskan bertahun-tahun silam, yang meringkas keseluruhan teori), membran tak mempunyai teori medan sama sekali. Dia mengakui poin ini juga. Tapi dia tetap percaya diri bahwa persamaan untuk teori-M akhirnya akan ditemukan.

Pikiran saya jadi pusing. Jika dia benar, teori string sekali lagi akan mengalami transformasi radikal. Membran, yang dulunya dibuang ke tempat sampah sejarah fisika, tiba-tiba dihidupkan kembali.

Pangkal revolusi ini adalah bahwa teori string masih berkembang terbalik. Hari ini pun tak ada yang mengetahui prinsip fisika sederhana yang mendasari teori tersebut. Saya senang memvisualisasikan ini sebagai perjalanan di padang pasir dan secara kebetulan tersandung sebuah batu kerikil kecil nan indah. Ketika kita menyeka pasirnya, kita mendapati bahwa batu kerikil itu sebetulnya adalah bagian puncak sebuah piramida raksasa yang terkubur di bawah berton-ton pasir. Setelah berdekade-dekade penggalian pasir yang menyengsarakan, kita menemukan hieroglif misterius, kamar tersembunyi, dan terowongan. Suatu hari nanti, kita akan menemukan lantai dasar dan akhirnya membuka pintu keluar-masuk.

Dunia Bran

Salah satu fitur baru teori-M adalah bahwa ia tak hanya memperkenalkan string, melainkan seluruh kumpulan membran berdimensi berbeda-beda. Dalam gambaran ini, partikel titik disebut "bran-nol", karena kecil tak terhingga dan tidak mempunyai dimensi. Maka string adalah "bran-satu", karena ia merupakan objek satu-dimensi yang ditetapkan oleh panjangnya. Membran adalah "bran-dua", seperti permukaan bola basket, ditetapkan oleh panjang dan lebar. (Bola basket dapat melayang di tiga dimensi, tapi permukaannya hanya dua-dimensi.) Alam semesta kita mungkin suatu jenis "bran-tiga", objek

tiga-dimensi yang mempunyai panjang, lebar, dan ketebalan. (Sebagaimana dicatat seorang jenaka, jika ruang mempunyai dimensi *p*, di mana *p* adalah bilangan bulat, maka alam semesta kita adalah *p-brane* (bran-*p*), dilafalkan sebagai "*pea-brain*". Grafik memperlihatkan semua *pea-brain* ini disebut "*brane-scan*".)

Terdapat beberapa cara di mana kita bisa mempergunakan membran dan mengkolapskannya menjadi string. Sebagai ganti membungkus dimensi kesebelas, kita bisa juga mengiris khatulistiwa sebuah membran sebelas-dimensi, menghasilkan pita sirkuler. Bila kita menyusutkan ketebalan pita, maka pita menjadi string sepuluh-dimensi. Petr Horava dan Edward Witten menunjukkan bahwa kita memperoleh string heterotik dengan cara ini.

Kenyataannya, bisa ditunjukkan bahwa ada lima cara untuk mereduksi teori-M sebelas-dimensi menjadi sepuluh dimensi, dengan demikian menghasilkan lima teori superstring. Teori-M memberi kita jawaban intuitif cepat terhadap misteri tentang mengapa ada lima teori string berbeda. Bayangkan berdiri di sebuah puncak bukit besar dan memandang ke dataran di bawah. Dari titik dimensi ketiga yang menguntungkan, kita dapat melihat bagian-bagian dataran berbeda-beda yang disatukan ke dalam gambaran koheren tunggal. Demikian halnya, dari titik dimensi kesebelas yang menguntungkan, memandang ke dimensi kesepuluh, kita melihat selimut tebal lima teori superstring sebagai sesuatu yang tak lebih dari sekadar tambalan dimensi kesebelas yang berbeda-beda.

Dualitas

Walaupun Paul Townsend tidak dapat menjawab sebagian besar pertanyaan yang saya ajukan padanya waktu itu, yang akhirnya meyakinkan saya tentang kebenaran ide ini adalah kekuatan kesimetrian lain. Teori-M tak hanya memiliki set kesimetrian terbesar yang dikenal fisika, ia menyembunyikan satu trik lain lagi: dualitas, yang memberikan kemampuan ajaib kepada teori-M untuk menyerap lima teori superstring menjadi satu teori.

Perhatikan listrik dan magnetisme, yang diatur berdasarkan persamaan Maxwell. Sudah lama diketahui bahwa jika Anda menukar medan listrik dengan medan magnet, persamaan itu kelihatan hampir sama. Kesimetrian ini dapat dibuat tepat bila Anda bisa menambahkan monokutub (kutub magnet tunggal) ke dalam persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell yang direvisi ini tetap persis sama jika kita menukar medan listrik dengan medan magnet dan menukar muatan listrik e dengan muatan magnet g. Ini artinya listrik (bila muatan listrik rendah) persis ekuivalen dengan magnetisme (bila muatan magnet tinggi). Keekuivalenan ini disebut dualitas.

Di masa lalu, dualitas ini dianggap tak lebih dari sekadar barang aneh ilmiah, trik asing, karena tak ada yang pernah melihat monokutub, bahkan hingga hari ini. Namun fisikawan menganggap luar biasa bahwa persamaan Maxwell memiliki kesimetrian tersembunyi yang tampaknya tidak digunakan oleh alam (setidaknya di sektor alam semesta kita).

Demikian pula, lima teori string semuanya merupakan dual

terhadap satu sama lain. Perhatikan teori string tipe I dan teori string heterotik $SO(32)$. Normalnya dua teori ini tidak terlihat serupa. Teori tipe I didasarkan pada string terbuka dan tertutup yang bisa berinteraksi dengan lima cara berbeda, dengan pemisahan dan penjalinan string. String $SO(32)$, di sisi lain, didasarkan sepenuhnya pada string tertutup yang mempunyai satu kemungkinan cara interaksi, mengalami mitosis seperti sebuah sel. String tipe I ditetapkan sepenuhnya di ruang sepuluh-dimensi, sedangkan string $SO(32)$ ditetapkan dengan satu set vibrasi yang ditetapkan di ruang 26-dimensi.

Normalnya, Anda tidak mungkin menemukan dua teori yang terlihat begitu berbeda. Bagaimanapun, sebagaimana pada elektromagnetisme, teori-teori mempunyai dualitas yang berpengaruh: jika Anda meningkatkan kekuatan interaksi, string tipe I berubah menjadi string heterotik $SO(32)$, seperti sulap. (Hasil ini begitu tak terduga sehingga ketika saya melihatnya, saya menggelengkan kepala keheranan. Dalam fisika, kita jarang melihat dua teori yang terlihat sama sekali berbeda dalam semua aspek namun ditunjukkan ekuivalen secara matematis.)

Lisa Randall

Barangkali keunggulan terbesar yang dimiliki teori-M dibanding teori string adalah bahwa dimensi-dimensi lebih tinggi ini, bukannya sungguh kecil, sebetulnya sungguh besar dan bahkan bisa diamati di laboratorium. Dalam teori string, enam dari dimensi tinggi yang ada

harus dibungkus ke dalam sebuah bola kecil, manifold Calabi-Yau, terlampau kecil untuk diamati dengan instrumen masa kini. Enam dimensi ini semuanya telah dikompaktifikasi, sehingga untuk memasuki sebuah dimensi lebih tinggi adalah mustahil—lebih mengecewakan bagi mereka yang berharap suatu hari dapat mengintip *hyperspace* tak terhingga dibanding mengambil jalan pintas singkat lewat *wormhole* menuju *hyperspace* yang sudah dikompaktifikasi.

Bagaimanapun, teori-M juga menonjolkan membran; adalah mungkin untuk memandang keseluruhan alam semesta kita sebagai sebuah membran yang mengapung di alam semesta yang jauh lebih besar. Alhasil, tidak semua dimensi tinggi ini harus dibungkus dalam sebuah bola. Beberapa dari mereka, kenyataannya, bisa besar sekali, membentang tak terhingga.

Seorang fisikawan yang telah mencoba mengeksploitasi gambaran baru alam semesta ini adalah Lisa Randall dari Harvard. Sedikit mirip aktris Jodie Foster, Randal terlihat tak pada tempatnya dalam profesi fisika teoritis yang berisi pria bersemangat, didorong oleh testosteron, dan sengit kompetitif. Dia mengejar ide bahwa alam semesta sebetulnya adalah bran-tiga yang mengapung di ruang dimensi lebih tinggi, barangkali itu menjelaskan mengapa gravitasi begitu jauh lebih lemah dibanding tiga gaya lain.

Randal tumbuh besar di Queens, New York (sektor/wilayah yang sama yang diabadikan oleh Archie Bunker). Meski saat anak-anak tidak memperlihatkan minat khusus dalam fisika, dia sangat

menyenangi matematika. Walaupun saya yakin kita semua saat anak-anak adalah ilmuwan alamiah, tidak semua dari kita yang berusaha meneruskan kecintaan kita pada sains saat dewasa. Alasannya adalah bahwa terbentur tembok matematika.

Suka tidak suka, jika kita ingin mengejar karir dalam sains, pada akhirnya kita harus memperlajari "bahasa alam": matematika. Tanpa matematika, kita hanya bisa menjadi pengamat pasif dalam tarian alam, bukan partisipan aktif. Sebagaimana kata Einstein suatu kali, "Matematika murni adalah syair ide-ide logis." Izinkan saya menyodorkan analogi. Seseorang boleh saja mencintai peradaban dan literatur Prancis, tapi untuk sungguh-sungguh memahami pikiran Prancis, dia harus mempelajari bahasa Prancis dan bagaimana mengkonjugasikan kata kerja Prancis. Hal yang sama berlaku pada sains dan matematika. Galileo pernah menulis, "[Alam semesta] tidak dapat dibaca sampai kita mempelajari bahasanya dan akrab dengan karakter tulisannya. Ia tertulis dalam bahasa matematika, huruf-hurufnya adalah segitiga, lingkaran, dan gambar geometris lain, tanpanya, secara manusiawi mustahil untuk memahami sepatah kata pun."

Tapi matematikawan sering membanggakan diri sebagai yang paling tidak praktis di antara semua ilmuwan. Semakin abstrak dan tak bermanfaat, semakin baik matematika itu. Yang mendorong Randall menempuh arah berbeda saat menjadi mahasiswa di Harvard pada awal 1980-an adalah fakta bahwa dia menyukai ide bahwa fisika dapat menciptakan "model" alam semesta. Ketika kita fisikawan

pertama kali mengajukan sebuah teori baru, itu tidak hanya didasarkan pada sekumpulan persamaan. Teori-teori fisika baru biasanya didasarkan pada model ideal yang disederhanakan yang menaksir sebuah fenomena. Model-model ini biasanya deskriptif, bergambar, dan mudah dimengerti. Model quark, misalnya, didasarkan pada ide bahwa dalam sebuah proton terdapat tiga konstituen kecil, quark. Randall terkesan bahwa model-model sederhana, didasarkan pada gambaran fisik, bisa cukup menjelaskan banyak hal di alam semesta.

Pada 1990-an, dia menjadi tertarik pada teori-M, pada kemungkinan bahwa keseluruhan alam semesta adalah membran. Dia membidik fitur gravitasi yang barangkali paling membingungkan, bahwa kekuatannya amat kecil. Newton maupun Einstein belum menangani pertanyaan fundamental tapi misterius ini. Sementara tiga gaya lain di alam semesta (elektromagnetisme, gaya nuklir lemah, dan gaya nuklir kuat) kurang lebih berkekuatan sama, gravitasi berbeda.

Khususnya, massa quark begitu jauh lebih kecil daripada massa yang diasosiasikan dengan gravitasi quantum. "Selisihnya tidak kecil; dua skala massa terpisah sebesar 16 orde magnitudo! Hanya teori-teori yang menjelaskan rasio besar ini yang paling mungkin menjadi kandidat sebagai teori yang mendasari Standar Model," kata Randall.

Fakta bahwa gravitasi begitu lemah menjelaskan mengapa bintang-bintang begitu besar. Bumi, dengan lautannya, pegunungannya, benuanya, hanyalah bintik kecil manakala dibandingkan dengan ukuran masif Matahari. Tapi lantaran gravitasi begitu lemah, diperlukan massa bintang untuk memeras hidrogen agar bisa mengatasi gaya

tolak listrik proton. Jadi bintang-bintang berukuran begitu masif karena gravitasi begitu lemah dibandingkan gaya-gaya lain.

Dengan teori-M yang menimbulkan begitu banyak kegemparan dalam fisika, beberapa kelompok telah mencoba menerapkan teori ini pada alam semesta kita. Asumsikan alam semesta adalah bran-tiga yang mengapung di dunia lima-dimensi. Kali ini, vibrasi-vibrasi di permukaan bran-tiga ekuivalen dengan atom-atom yang kita lihat di sekitar kita. Dengan demikian, vibrasi ini tak pernah meninggalkan bran-tiga dan karenanya tidak bisa mengeluyur ke dimensi kelima. Sungguhpun alam semesta kita mengapung di dimensi kelima, atom-atom kita tidak bisa meninggalkan alam semesta kita karena mereka melambangkan vibrasi di permukaan bran-tiga. Kalau begitu, ini dapat menjawab pertanyaan yang diajukan Kaluza dan Einstein pada 1921: di mana dimensi kelima berada? Jawabannya adalah: kita mengapung di dimensi kelima, tapi kita tak dapat memasukinya karena tubuh kita tertempel di permukaan bran-tiga.

Tapi terdapat cacat potensial dalam gambaran ini. Gravitasi melambangkan pelengkungan ruang. Dengan demikian, secara naif kita dapat mengira bahwa gravitasi bisa memenuhi seluruh ruang lima-dimensi, daripada bran-tiga saja; dalam hal demikian, gravitasi akan melemah sewaktu meninggalkan bran-tiga. Ini memperlemah gaya gravitasi. Ini merupakan hal bagus untuk mendukung teori, sebab gravitasi, kita tahu, begitu jauh lebih lemah daripada gaya-gaya lain. Tapi ini terlalu memperlemah gravitasi: hukum kuadrat terbalik Newton akan dilanggar, padahal hukum kuadrat terbalik tersebut

bekerja secara sempurna untuk planet, bintang, dan galaksi. Tak ada di ruang angkasa kita menemukan hukum kubik terbalik gravitasi. (Bayangkan sebuah bohlam yang menerangi ruangan. Cahayanya menyebar pada bulatan/bola. Kekuatan cahaya melemah di sepanjang [bidang] bola ini. Dengan demikian, bila Anda menggandakan radius bola, maka cahayanya menyebar di atas bola dengan area empat kali lipat. Secara umum, jika bohlam eksis di ruang *n*-dimensi, maka cahayanya melemah di sepanjang [bidang] bola yang areanya bertambah sewaktu radius dinaikkan ke *n*, 1 pangkat.)

Untuk menjawab pertanyaan ini, sekelompok ilmuwan, meliputi N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, dan G. Dvali, menyatakan bahwa barangkali dimensi kelima tidak tak terhingga melainkan satu milimeter jauhnya dari dimensi kita, mengapung persis di atas alam semesta kita, sebagaimana dalam kisah sains fiksi H. G. Wells. (Bila dimensi kelima lebih jauh dari satu milimeter, maka itu mungkin menciptakan pelanggaran terukur terhadap hukum kuadrat terbalik Newton.) Bila dimensi kelima hanya satu milimeter jauhnya, prediksi ini dapat diuji dengan mencari penyimpangan kecil pada hukum gravitasi Newton dalam jarak sangat kecil. Hukum gravitasi Newton bekerja dengan baik dalam jarak astronomi, tapi belum pernah diuji sampai ke ukuran satu milimeter. Para pelaksana eksperimen kini sedang sibuk menguji untuk mencari penyimpangan kecil dari hukum kuadrat terbalik Newton. Hasil ini menjadi subjek beberapa eksperimen yang sedang berjalan, sebagaimana akan kita lihat di bab 9.

Randall dan koleganya, Raman Sundrum, memutuskan mengambil pendekatan baru, untuk memeriksa ulang kemungkinan bahwa dimensi kelima bukan satu milimeter jauhnya, melainkan tak terhingga. Untuk melakukan ini, mereka harus menjelaskan bagaimana dimensi kelima bisa tak terhingga tanpa merusak hukum gravitasi Newton. Di sinilah Randall menemukan jawaban potensial untuk teka-teki tersebut. Dia menemukan bahwa bran-tiga mempunyai tarikan gravitasi sendiri yang mencegah graviton mengeluyur ke dimensi kelima. Graviton pasti melekat ke bran-tiga tersebut (seperti lalat yang terperangkap kertas penangkap lalat) lantaran adanya gravitasi yang dikerahkan oleh bran-tiga. Dengan demikian, ketika kita mencoba mengukur hukum Newton, kita mendapati bahwa ia di alam semesta kita kurang-lebih tepat. Gravitasi melemah sewaktu meninggalkan bran-tiga dan mengeluyur ke dimensi kelima, tapi tidak terlalu jauh: hukum kuadrat terbalik masih terpelihara secara kasar sebab graviton-graviton masih tertarik ke bran-tiga. (Randall juga memperkenalkan kemungkinan sebuah membran kedua yang eksis secara paralel dengan punya kita. Bila kita mengkalkulasi interaksi halus gravitasi di antara kedua membran, itu bisa disetel agar kita dapat menjelaskan kelemahan gravitasi secara numeris.)

"Timbul banyak kegemparan ketika pertama kali dinyatakan bahwa dimensi-dimensi tambahan menyediakan cara alternatif untuk mengatasi pangkal [persoalan hirarki]," kata Randall. "Dimensi ruang tambahan mungkin mulanya terasa seperti ide liar dan sinting, tapi

ada alasan kuat untuk percaya bahwa dimensi ruang tambahan betul-betul eksis."

Jika para fisikawan ini benar, maka gravitasi sama kuatnya dengan gaya-gaya lain, kecuali bahwa gravitasi melemah lantaran sebagian darinya bocor ke ruang dimensi lebih tinggi. Konsekuensi mendalam dari teori ini adalah bahwa level energi yang membuat efek-efek quantum ini bisa diukur mungkin bukanlah energi Planck (10^{19} miliar eV), sebagaimana anggapan terdahulu. Barangkali dibutuhkan triliunan eV, di mana Large Hadron Collider (dijadwalkan rampung pada 2007) sanggup mendapatkan efek gravitasi quantum tersebut pada dekade ini. Ini telah merangsang minat besar di kalangan fisikawan eksperimen untuk memburu partikel-partikel eksotis di luar partikel subatom Standard Model. Barangkali efek-efek gravitasi quantum ada dalam jangkauan kita.

Membran juga memberikan jawaban masuk akal, meski spekulatif, terhadap teka-teki *dark matter*. Dalam novel H. G. Wells, *The Invisible Man*, sang tokoh protagonis melayang-layang di dimensi keempat dan akibatnya tidak terlihat. Demikian halnya, bayangkan terdapat sebuah dunia paralel yang melayang-layang persis di atas alam semesta kita. Galaksi di alam semesta paralel tersebut tidak akan terlihat oleh kita. Tapi karena gravitasi disebabkan oleh penekukan *hyperspace*, gravitasi dapat meloncat di antara alam semesta-alam semesta. Galaksi besar di alam semesta tersebut akan tertarik menyeberangi *hyperspace* ke galaksi di alam semesta kita. Dengan demikian, saat kita mengukur atribut galaksi kita, kita akan mendapati bahwa tarikan

gravitasinya jauh lebih kuat dari perkiraan hukum Newton sebab terdapat sebuah galaksi lain yang bersembunyi persis di belakangnya, mengapung di bran dekat. Galaksi tersembunyi yang bertengger di belakang gravitasi kita ini tidak akan terlihat sama sekali, mengapung di dimensi lain, tapi ia akan memberi tampilan halo di sekeliling galaksi kita yang mengandung 90% massa. Dengan demikian, *dark matter* mungkin disebabkan oleh kehadiran alam semesta paralel.

Alam Semesta yang Bertubrukan

Mungkin sedikit prematur untuk menerapkan teori-M pada kosmologi sungguhan. Namun demikian, fisikawan telah mencoba menerapkan "fisika bran" untuk memberi corak baru pada pendekatan inflasi biasa. Tiga kosmologi potensial telah menarik perhatian.

Kosmologi pertama mencoba menjawab pertanyaan: mengapa kita hidup di empat dimensi ruang-waktu? Secara prinsip, teori-M dapat dirumuskan di semua dimensi sampai sebelas dimensi, jadi dipilihnya empat dimensi terasa seperti sebuah misteri. Robert Brandenberger dan Cumrun Vafa berspekulasi bahwa ini mungkin disebabkan oleh geometri istimewa string.

Dalam skenario mereka, alam semesta berawal secara simetris sempurna, dengan semua dimensi tinggi yang tergulung ketat pada skala Planck. Yang mencegah alam semesta untuk mengembang adalah simpal-simpal string yang menggulungkan diri pada dimensi-dimensi beraneka ragam. Bayangkan gulungan mampat yang tidak bisa mengembang lantaran dililit ketat oleh string. Jika string putus,

gulungan mendadak terbebas dan mengembang/memuai.

Di dimensi-dimensi kecil ini, alam semesta tercegah mengembang karena memiliki lilitan string dan antistring (kasarnya, antistring melilit ke arah yang berbeda dari string). Jika string dan antistring bertubrukan, maka mereka bisa menghancurkan dan menghilang, seperti penguraian sebuah simpul. Di dimensi-dimensi sangat besar, terdapat begitu banyak "ruangan" sehingga string dan antistring jarang bertubrukan dan tak pernah terurai. Namun, Brandenberger dan Vafa menunjukkan bahwa di tiga dimensi ruang atau lebih rendah, kemungkinan besar string-string akan bertubrukan dengan antistring-antistring. Sekali tubrukan ini terjadi, string-string terurai, dan dimensi-dimensi itu tumbuh ke arah luar secara cepat, memberi kita *big bang*. Fitur menarik dari gambaran ini adalah bahwa topologi stringnya menjelaskan secara kasar mengapa kita melihat ruang-waktu empat-dimensi yang familiar di sekeliling kita. Alam semesta-alam semesta dimensi tinggi mungkin bisa, tapi kemungkinannya kecil, dilihat karena mereka masih dililit ketat oleh string dan antistring.

Tapi ada kemungkinan-kemungkinan lain juga dalam teori-M. Bila alam semesta-alam semesta bisa terpetik atau berkuncup dari satu sama lain, menelurkan alam semesta-alam semesta baru, maka mungkin hal yang sebaliknya bisa terjadi: alam semesta-alam semesta dapat bertubrukan, menciptakan percikan api dalam proses tersebut, menelurkan alam semesta baru. Dalam skenario demikian, barangkali *big bang* terjadi lantaran adanya tubrukan dua alam semesta-bran

paralel, daripada sekadar penguncupan sebuah alam semesta.

Teori kedua ini diajukan oleh fisikawan Paul Steinhardt dari Princeton, Burt Ovrut dari Universitas Pennsylvania, dan Neil Turok dari Universitas Cambridge, yang membuat [model] alam semesta "*ekpyrotic*" (yang berarti "kebakaran besar/lautan api" dalam bahasa Yunani) untuk memasukkan fitur gambaran bran-M yang baru, di mana beberapa dari dimensi tambahan itu bisa berukuran besar dan bahkan tak terhingga. Dimensi-dimensi tambahan tersebut dimulai dengan dua bran-tiga paralel, homogen dan flat yang melambangkan kondisi/status energi terendah. Mulanya, mereka berawal sebagai alam semesta dingin dan hampa, tapi gravitasi menarik mereka. Akhirnya mereka bertubrukan, dan energi kinetik besar dari tubrukan itu berkonversi menjadi materi dan radiasi yang menyusun alam semesta kita. Beberapa orang menyebut ini sebagai teori "*big splat*", daripada teori *big bang*, karena skenarionya melibatkan tubrukan dua bran.

Tenaga tubrukan mendorong kedua alam semesta saling menjauh. Selagi saling memisah, dua membran ini mendingin dengan cepat, menghasilkan alam semesta yang kita lihat hari ini. Pendinginan dan perluasan berlanjut selama triliunan tahun, sampai alam semesta-alam semesta tersebut mendekati temperatur nol absolut, dan densitasnya hanya satu elektron per quadriliun tahun-cahaya ruang kubik. Praktisnya, alam semesta menjadi hampa dan lembam. Tapi gravitasi terus menarik kedua membran, sampai, triliunan tahun kemudian, mereka bertubrukan sekali lagi, dan siklus tersebut

mengulangi semuanya dari awal lagi.

Skenario baru ini sanggup mendapatkan temuan baru dari inflasi (keflatan, keseragaman). Ia memecahkan pertanyaan tentang mengapa alam semesta begitu flat—karena dua bran [berbentuk] flat saat di awal. Model ini juga menjelaskan persoalan horison—yakni, mengapa alam semesta terlihat luar biasa seragam di semua arah. Karena membran punya waktu yang panjang untuk secara perlahan mencapai ekuilibrium. Dengan demikian, sementara inflasi menjelaskan persoalan horison dengan menetapkan alam semesta yang berinflasi secara tiba-tiba, skenario ini memecahkan persoalan horison dengan cara berlawanan, dengan menetapkan alam semesta yang mencapai ekuilibrium dalam gerakan lamban.

(Ini juga berarti bahwa kemungkinan terdapat membran-membran lain yang mengapung di *hyperspace* yang dapat bertubrukan dengan punya kita di masa mendatang, menciptakan *big splat* lain. Berdasarkan fakta bahwa alam semesta kita sedang berakselerasi, tubrukan lain kenyataannya merupakan sebuah kemungkinan besar. Steinhardt menambahkan, "Mungkin percepatan perluasan alam semesta merupakan pendahuluan tubrukan semacam itu. Pemikiran ini tidak mengenakkan.")

Suatu skenario yang secara dramatis menantang gambaran inflasi yang berlaku pasti mendatangkan jawaban sengit. Kenyataannya, dalam seminggu setelah makalah ini ditaruh di web, Andrei Linde beserta istrinya, Renata Kallosh (teoris string), dan Lev Kofman dari Universitas Toronto mengeluarkan kritik atas skenario ini. Linde

mengkritik model ini karena segala sesuatu yang begitu katastropis seperti tubrukan dua alam semesta dapat menghasilkan singularitas, di mana temperatur dan densitas mendekati tak terhingga. "Itu sama dengan melempar sebuah kursi ke dalam *black hole,* yang akan menguapkan partikel-partikel kursi, lantas kita menyatakan bahwa *black hole,* entah bagaimana, mempertahankan bentuk kursi," protes Linde.

Steinhardt menyerang balik, mengatakan, "Yang terlihat seperti singularitas di empat dimensi mungkin bukan singularitas di lima dimensi... Saat bran-bran termamah bersama-sama, dimensi kelima lenyap untuk sementara, tapi bran-bran sendiri tidak lenyap. Jadi densitas dan temperatur tidak menjadi tak terhingga, dan waktu terus berjalan. Walaupun relativitas umum mengamuk, teori string tidak. Dan apa yang dulu terlihat seperti sebuah malapetaka dalam model kita, kini dapat dikendalikan."

Steinhardt mempunyai kekuatan teori-M di sisinya, yang dikenal menyingkirkan singularitas. Kenyataannya, itulah alasannya mengapa para fisikawan teoritis memerlukan teori gravitasi quantum saat memulai, untuk menyingkirkan semua ketakterhinggaan. Namun, Linde menguraikan kerentanan konseptual dalam gambaran ini, bahwa bran eksis dalam kondisi/status flat dan seragam di permulaan. "Jika Anda memulai dengan kesempurnaan, anda mungkin bisa menjelaskan apa yang Anda lihat...tapi Anda masih belum menjawab pertanyaan: Mengapa alam semesta berawal sempurna?" kata Linde. Steinhardt menjawab balik, "Flat tambah flat sama dengan flat."

Dengan kata lain, Anda harus berasumsi bahwa membran-membran berawal dalam status energi terendah, flat.

Alan Guth berpikiran terbuka. "Saya tidak berpikir Paul dan Neil hampir membuktikan kasus mereka. Tapi ide-ide mereka tentu saja berharga untuk dipertimbangkan," katanya. Dia balas menyerang dan menantang teoris string untuk menjelaskan inflasi: "Dalam jangka panjang, saya pikir tidak terelakkan lagi bahwa teori string dan teori-M akan harus memasukkan inflasi, sebab inflasi merupakan solusi kentara untuk persoalan yang hendak diselesaikan—yakni, mengapa alam semesta begitu seragam dan flat." Jadi dia mengajukan pertanyaan: bisakah teori-M memperoleh gambaran standar inflasi?

Terakhir, ada teori kosmologi saingan lain yang mempergunakan teori string, teori "pra-*big bang*" Gabriele Veneziano, fisikawan yang membantu merintis teori string pada 1968. Dalam teorinya, alam semesta sebetulnya berawal sebagai *black hole*. Bila kita ingin tahu seperti apa bagian dalam sebuah *black hole*, yang perlu kita lakukan hanya melihat bagian luar.

Dalam teori ini, alam semesta betul-betul tua tak terhingga dan berawal jauh di masa lampau dalam keadaan hampa dan dingin. Gravitasi mulai menghasilkan gumpalan materi di sepanjang alam semesta, yang secara bertahap berkondensasi menjadi kawasan-kawasan begitu padat hingga berubah menjadi *black hole*. Horison peristiwa mulai terbentuk di sekitar masing-masing *black hole*, memisahkan secara permanen eksterior horison persitiwa dari interiornya. Dalam tiap-tiap horison peristiwa, materi terus

dimampatkan oleh gravitasi, sampai *black hole* akhirnya mencapai panjang Planck.

Pada titik ini, teori string mengambil alih. Panjang Planck adalah jarak minimum yang diperkenankan oleh teori string. Kemudian *black hole* mulai melambung dalam ledakan besar, menimbulkan *big bang*. Karena proses ini bisa berulang-ulang di sepanjang alam semesta, artinya kemungkinan terdapat *black hole*/alam semesta jauh lain.

(Ide bahwa alam semesta kita kemungkinan adalah *black hole* tidaklah dibuat-buat seperti kelihatannya. Kita mempunyai pemikiran intuitif bahwa *black hole* pasti amat sangat padat, dengan medan gravitasi besar dan menghancurkan, tapi kasusnya tidak selalu demikian. Ukuran horison peristiwa *black hole* adalah proporsional dengan massanya. Semakin masif sebuah *black hole*, semakin besar horison peristiwanya. Tapi horison peristiwa yang lebih besar mengandung arti bahwa materi tersebar pada volume lebih besar; alhasil, densitas betul-betul menurun, sementara massa meningkat. Kenyataannya, seandainya *black hole* seberat alam semesta kita, ukurannya akan kurang-lebih seukuran alam semesta kita, dan densitasnya akan sungguh rendah, sebanding dengan densitas alam semesta kita.)

Bagaimanapun, beberapa astrofisikawan tidak terkesan dengan penerapan teori string dan teori-M pada kosmologi. Joel Primack dari Universitas California di Santa Cruz kurang toleran dibanding yang lain: "Saya pikir sangat bodoh mengerjakan hal ini secara berlebihan... Ide dalam makalah-makalah ini pada esensinya tidak dapat diuji."

Hanya waktu yang akan mengatakan apakah Primack benar, tapi karena langkah teori string sedang melaju, kita mungkin akan menemukan resolusi atas persoalan ini segera, dan itu mungkin berasal dari satelit-satelit antariksa kita. Sebagaimana akan kita lihat di bab 9, detektor gelombang gravitasi generasi baru yang akan dikerahkan ke angkasa luar pada tahun 2020, seperti LISA, bisa memberi kita kemampuan untuk menyingkirkan atau memverifikasi beberapa teori ini. Jika teori inflasi benar, misalnya, LISA semestinya mendeteksi gelombang gravitasi kasar yang dihasilkan oleh proses inflasi awal. Sedangkan teori alam semesta *ekpyrotic* memprediksikan tubrukan pelan antara alam semesta-alam semesta dan karenanya gelombang gravitasinya jauh lebih lembut. LISA semestinya mampu menyingkirkan salah satu teori ini berdasarkan eksperimen. Dengan kata lain, data yang dibutuhkan untuk menentukan skenario mana yang benar tersandi dalam gelombang gravitasi yang dihasilkan oleh *big bang* awal. LISA mungkin mampu, untuk pertama kalinya, memberikan hasil eksperimen kokoh menyangkut inflasi, teori string, dan teori-M.

Mini-Black Hole

Karena teori string sebetulnya merupakan teori tentang keseluruhan alam semesta, untuk mengujinya diperlukan pembuatan alam semesta di laboratorium (lihat bab 9). Normalnya, kita mengira efek-efek quantum dari gravitasi terjadi pada energi Planck, yang satu quadriliun kali lebih kuat dari akselerator partikel terhebat kita,

membuat pengujian langsung teori string menjadi mustahil. Tapi jika betul-betul ada alam semesta paralel yang eksis kurang dari satu milimeter dari alam semesta kita, maka level energi unifikasi dan efek-efek quantum mungkin sungguh rendah, dalam jangkauan akselerator partikel generasi berikutnya, seperti Large Hadron Collider (LHC). Ini, pada gilirannya, telah memercikkan segudang ketertarikan kepada fisika *black hole*, yang paling mengasyikkan adalah "mini-*black hole*". Mini-*black hole*, yang bertindak seolah-olah seperti partikel subatom, merupakan "laboratorium" di mana seseorang dapat menguji beberapa prediksi teori string. Fisikawan bergairah dengan kemungkinan pembuatan mini-*black hole* dengan LHC. (Mini-*black hole* berukuran begitu kecil, sebanding dengan ukuran elektron, sehingga tak ada ancaman bahwa mereka akan menelan Bumi. Sinar kosmik secara rutin menghantam Bumi dengan energi melampaui mini-*black hole* ini, tanpa efek berbahaya terhadap planet ini.)

Meski kedengarannya revolusioner, *black hole* yang menyamar sebagai partikel subatom sebetulnya adalah ide lama, pertama kali diperkenalkan oleh Einstein pada 1935. Dalam pandangan Einstein, pasti terdapat *unified field theory* di mana materi, terbuat dari partikel subatom, bisa dipandang sebagai suatu jenis distorsi dalam struktur ruang-waktu. Menurutnya, partikel subatom seperti elektron sebetulnya adalah "kekusutan" atau *wormhole* di ruang melengkung yang, dari kejauhan, terlihat seperti partikel. Einstein, bersama Nathan Rosen, bermain-main dengan ide bahwa elektron mungkin sebetulnya merupakan mini-*black hole* yang menyamar. Dengan caranya, dia

mencoba memasukkan materi ke dalam *unified field theory* ini, yang akan mereduksi partikel subatom menjadi geometri belaka.

Mini-*black hole* diperkenalkan lagi oleh Stephen Hawking, yang membuktikan bahwa *black hole* pasti menguap dan memancarkan pijaran redup energi. Setelah berwaktu-waktu yang panjang, *black hole* akan memancarkan begitu banyak energi sehingga lambat laun ia menyusut, akhirnya menjadi seukuran partikel subatom.

Teori string kini sedang memperkenalkan kembali konsep mini-*black hole*. Ingat, *black hole* terbentuk ketika sejumlah besar materi termampatkan ke bawah radius Schwarzschild-nya. Karena massa dan energi bisa berkonversi menjadi satu sama lain, *black hole* juga bisa diciptakan dengan memampatkan energi. Terdapat ketertarikan besar tentang apakah LHC sanggup memproduksi mini-*black hole* di antara puing-puing yang dihasilkan oleh penubrukan dua proton secara bersama-sama pada energi 14 triliun eV. *Black hole-black hole* ini akan kecil sekali, barangkali hanya berbobot seribuan kali massa elektron, dan bertahan selama 10^{-23} detik saja. Tapi mereka akan jelas terlihat di antara bekas-bekas partikel subatom yang dihasilkan oleh LHC.

Fisikawan juga berharap sinar kosmik dari angkasa luar mengandung mini-*black hole*. Pierre Auger Cosmic Ray Observatory di Argentina begitu sensitif sehingga ia dapat mendeteksi beberapa semburan sinar kosmik terbesar yang pernah terekam oleh sains. Harapannya adalah bahwa mini-*black hole* bisa ditemukan secara alami di antara sinar kosmik, yang akan menghasilkan pancaran radiasi khas ketika menghantam atmosfer atas Bumi. Sebuah kalkulasi

menunjukkan bahwa detektor Auger Cosmic Ray mungkin sanggup mengenali sampai sepuluh pancaran sinar kosmik per tahun yang dipicu oleh mini-*black hole*.

Pendeteksian mini-*black hole* di LHC (Swiss) ataupun di detektor Auger Cosmic Ray (Argentina), mungkin dalam dekade ini, akan menyediakan bukti bagus mengenai eksistensi alam semesta paralel. Walaupun tidak membuktikan kebenaran teori string secara tegas, itu akan meyakinkan seluruh komunitas fisika bahwa teori string konsisten dengan semua hasil eksperimen dan berada di arah yang benar.

Black Hole dan Paradoks Informasi

Teori string juga bisa memberi keterangan tentang beberapa paradoks terdalam fisika *black hole*, misalnya paradoks informasi. Sebagaimana Anda ingat, *black hole* tidak gelap sempurna melainkan memancarkan radiasi kecil via *tunneling*. Berkat teori quantum, selalu terdapat kemungkinan kecil radiasi tersebut bisa melarikan diri dari cengkeraman gravitasi *black hole* yang mirip jepitan. Ini mengakibatkan kebocoran radiasi secara perlahan dari *black hole*, disebut radiasi Hawking.

Radiasi ini, pada gilirannya, mempunyai temperatur yang diasosiasikan dengannya (yang proporsional dengan area permukaan horison peristiwa *black hole*). Hawking memberikan derivasi umum persamaan ini yang melibatkan banyak tangan. Namun, derivasi keras temuan ini mengharuskan penggunaan kekuatan penuh mekanika

statistik (didasarkan pada penghitungan status quantum *black hole*). Biasanya, kalkulasi mekanika statistik dikerjakan dengan menghitung jumlah status yang dapat diduduki oleh sebuah atom atau molekul. Tapi bagaimana Anda menghitung status quantum sebuah *black hole*? Dalam teori Einstein, *black hole* [bersifat] halus sempurna, sehingga penghitungan status quantum mereka problematis.

Teori-teori string ingin sekali menutup gap ini, jadi Andrew Strominger dan Cumrum Vafa dari Harvard memutuskan untuk menganalisa *black hole* memakai teori-M. Karena *black hole* sendiri terlalu sulit untuk dikerjakan, mereka mengambil pendekatan berbeda dan mengajukan pertanyaan cerdik: apa dual untuk *black hole*? (Kita ingat bahwa elektron adalah dual untuk monokutub magnet, misalnya satu kutub utara. Karenanya, dengan memeriksa elektron di medan listrik lemah, yang mana mudah dilakukan, kita dapat menganalisa eksperimen yang jauh lebih sulit: penempatan monokutub di medan magnet yang amat besar.) Harapannya adalah bahwa dual *black hole* akan lebih mudah dianalisa dibanding *black hole*-nya sendiri, walaupun mereka akhirnya memperoleh temuan akhir yang sama. Melalui serangkaian manipulasi matematis, Strominger dan Vafa sanggup menunjukkan bahwa *black hole* merupakan dual untuk sekumpulan bran-satu dan bran-lima. Ini luar biasa melegakan, karena penghitungan status quantum bran-bran ini sudah diketahui. Lalu saat Strominger dan Vafa mengkalkulasi jumlah status quantum, mereka menemukan bahwa jawabannya persis mereproduksi temuan Hawking.

Ini merupakan potongan kabar menggembirakan. Teori string, yang kadang-kadang diejek lantaran tidak berhubungan dengan dunia riil, barangkali memberikan solusi paling elegan untuk termodinamika *black hole*.

Sekarang, para teoris string tengah mencoba memecahkan persoalan paling sulit dalam fisika *black hole*, "paradoks informasi". Hawking berargumen bahwa bila Anda melemparkan sesuatu ke dalam sebuah *black hole*, informasi yang dikandung hilang selama-lamanya, takkan pernah kembali lagi. (Ini bisa menjadi cara cerdik untuk melakukan kejahatan sempurna. Seorang penjahat bisa menggunakan *black hole* untuk memusnahkan semua bukti yang memberatkan.) Dari kejauhan, parameter yang bisa kita ukur dari *black hole* hanyalah massa, putaran, dan muatannya. Tak peduli apa pun yang Anda lemparkan ke dalam *black hole*, Anda akan kehilangan semua informasinya. (Ini dikenal dengan pernyataan "*black hole* tidak memiliki rambut"—yakni, ia telah menghilangkan semua informasi, semua rambut, kecuali untuk tiga parameter ini.

Hilangnya informasi dari alam semesta kita kelihatannya merupakan konsekuensi tak terelakkan dari teori Einstein, tapi ini melanggar prinsip mekanika quantum, yang menyatakan bahwa informasi tak pernah betul-betul hilang. Di suatu tempat, informasi tersebut pasti sedang mengapung di alam semesta kita, sekalipun objek aslinya telah terlempar ke tenggorokan *black hole*.

"Sebagian besar fisikawan ingin percaya bahwa informasi tidak hilang," tulis Hawking, "sebab ini akan membuat dunia menjadi aman

dan bisa diprediksi. Tapi saya percaya bahwa bila seseorang memikirkan relativitas umum Einstein secara serius, dia pasti memperkenankan kemungkinan bahwa ruangwaktu sendiri terikat dalam simpul dan bahwa informasi menghilang dalam lipatan. Menentukan apakah informasi betul-betul menghilang atau tidak, merupakan salah satu pertanyaan besar dalam fisika teoritis hari ini."

Paradoks ini, yang mengadu Einstein dengan sebagian besar teoris string, masih belum terpecahkan. Tapi pertaruhan di kalangan teoris string adalah bahwa kita akhirnya akan menemukan ke mana informasi yang hilang itu pergi. (Contoh, bila Anda melempar sebuah buku ke dalam *black hole*, ada kemungkinan informasi yang terkandung dalam buku akan merembes ke luar kembali secara halus, ke alam semesta kita, dalam bentuk vibrasi-vibrasi kecil yang terkandung dalam radiasi Hawking dari *black hole* yang menguap. Atau barangkali akan muncul kembali dari *white hole* di sisi lain *black hole*.) Inilah alasannya mengapa saya secara pribadi merasa bahwa manakala seseorang akhirnya mengkalkulasi apa yang terjadi pada informasi ketika menghilang ke dalam *black hole* dalam teori string, dia akan menemukan bahwa informasi tidak betul-betul hilang melainkan muncul kembali secara halus di suatu tempat lain.)

Pada 2004, dalam kekalahan mengejutkan, Hawking masuk halaman depan *New York Times* ketika dia mengumumkan di depan kamera TV bahwa dirinya salah terkait persoalan informasi ini. (30 puluh tahun silam, dia bertaruh dengan fisikawan lain bahwa informasi takkan mungkin bocor dari *black hole*. Pihak yang kalah

harus memberi pihak pemenang sebuah ensiklopedia, yang darinya informasi dapat diperoleh kembali.) Menjalankan ulang kalkulasi terdahulu, dia berkesimpulan bahwa bila sebuah objek seperti buku jatuh ke dalam *black hole*, itu bisa mengganggu medan radiasi yang dipancarkannya, memungkinkan informasi bocor kembali ke alam semesta. Informasi yang terkandung dalam buku akan tersandi dalam radiasi yang secara perlahan merembes ke luar *black hole*, tapi dalam bentuk terkoyak-koyak.

Di satu sisi, ini membuat Hawking sejalan dengan mayoritas fisikawan quantum, yang percaya bahwa informasi tidak bisa hilang. Tapi ini juga menimbulkan pertanyaan: bisakah informasi berlalu ke alam semesta paralel? Di permukaan, temuannya terlihat memancarkan keraguan mengenai ide bahwa informasi kemungkinan melewati *wormhole* menuju alam semesta paralel. Namun, semua orang percaya bahwa ini bukan kalimat terakhir mengenai subjek tersebut. Sampai teori string dikembangkan secara utuh, atau kalkulasi gravitasi quantum yang lengkap dilakukan, tak ada yang akan percaya bahwa paradoks informasi terpecahkan sepenuhnya.

Alam Semesta Holografis

Terakhir, terdapat prediksi teori-M yang agak misterius yang masih tidak dimengerti tapi mungkin mempunyai konsekuensi fisikal dan filosofis mendalam. Temuan ini memaksa kita mengajukan pertanyaan: apakah alam semesta adalah hologram? Apakah ada "alam semesta bayangan" di mana tubuh kita eksis dalam bentuk

mampat dua-dimensi? Ini juga menimbulkan pertanyaan lain yang sama-sama menggelisahkan: apakah alam semesta adalah program komputer? Bisakah alam semesta ditempatkan pada CD, untuk dimainkan di waktu senggang kita?

Hologram kini bisa ditemukan pada kartu kredit, di museum anak, dan di taman hiburan. Ia luar biasa karena dapat menangkap citra tiga-dimensi utuh di permukaan dua-dimensi. Normalnya, jika Anda melihat sekilas sebuah foto dan kemudian menggerakkan kepala Anda, citra pada foto tidak berubah. Tapi hologram berbeda. Ketika Anda melihat sekilas sebuah gambar holografis dan kemudian menggerakkan kepala Anda, Anda mendapati gambar berubah, seolah-olah Anda sedang memandangi citra tersebut lewat jendala atau lubang kunci. (Hologram pada akhirnya dapat menghasilkan TV dan film tiga-dimensi. Di masa depan, barangkali kita akan santai di ruang tinggal kita dan menatap layar dinding yang memberi kita citra tiga-dimensi utuh lokasi-lokasi jauh, seolah-olah layar TV dinding betul-betul jendela yang mengintai lanskap baru. Lebih jauh, bila layar dinding dibentuk seperti silinder besar dengan ruang tinggal kita ditempatkan di tengah, seolah-olah kita terangkut ke dunia baru. Ke manapun kita memandang, kita akan melihat citra tiga-dimensi realitas baru, tak dapat dibedakan dari hal yang riil.)

Esensi hologram adalah bahwa permukaan dua-dimensi hologram meng-*encode* semua informasi yang diperlukan untuk mereproduksi citra tiga-dimensi. (Hologram dibuat di laboratorium dengan menyorotkan sinar laser ke pelat fotografis sensitif dan memungkin-

kan sinar tersebut berinterferensi dengan sinar laser dari sumber asli. Interferensi dua sumber cahaya itu menciptakan pola interferensi yang "membekukan" citra ke atas pelat dua-dimensi.)

Beberapa kosmolog menaksir bahwa ini juga mungkin berlaku pada alam semesta—bahwa kita mungkin hidup di sebuah hologram. Awal-mula spekulasi ganjil ini timbul dari fisika *black hole*. Penaksiran Bekenstein dan Hawking bahwa jumlah total informasi yang terkandung di *black hole* adalah proporsional dengan area permukaan horison peristiwanya (yang berbentuk bulat). Temuan ini ganjil, karena biasanya informasi yang tersimpan di sebuah objek adalah proporsional dengan volumenya. Contoh, jumlah informasi yang tersimpan di buku adalah proporsional dengan ukurannya, bukan dengan area permukaan sampulnya. Kita mengetahui ini secara naluriah, padahal kita mengatakan bahwa kita tak boleh menilai buku dari sampulnya. Tapi intuisi ini gagal untuk *black hole*: kita dapat sepenuhnya menilai *black hole* dari sampulnya.

Kita boleh mengabaikan hipotesis aneh ini karena *black hole* sendiri adalah barang aneh, di mana intuisi normal berhenti berfungsi. Namun, temuan ini juga berlaku pada teori-M, yang bisa memberi kita deskripsi terbaik mengenai keseluruhan alam semesta. Pada 1997, Juan Maldacena, di Institute for Advanced Study di Princeton, menciptakan sensasi saat dia menunjukkan bahwa teori string membawa pada alam semesta tipe baru, alam semesta holografis.

Dia memulai dengan "alam semesta anti-de Sitter" lima-dimensi yang sering muncul dalam teori string dan teori supergravitasi. Alam

semesta de Sitter adalah alam semesta berkonstanta kosmologis positif yang menghasilkan alam semesta yang berakselerasi. (Kita ingat bahwa alam semesta kita saat ini digambarkan secara sangat baik sebagai alam semesta de Sitter, dengan konstanta kosmologis yang mendorong galaksi-galaksi saling menjauh pada kecepatan semakin tinggi. Alam semesta anti-de Sitter mempunyai konstanta kosmologis negatif dan karenanya bisa berimplosi.) Maldacena menunjukkan bahwa terdapat dualitas di antara alam semesta 5-dimensi ini dan "perbatasan"-nya, yang merupakan alam semesta 4-dimensi. Cukup aneh memang, makhluk-makhluk yang hidup di ruang 5-dimensi ini secara matematis akan ekuivalen dengan makhluk-makhluk yang hidup di ruang 4-dimensi. Mustahil membedakan mereka.

Lewat analogi kasar, bayangkan ikan-ikan yang berenang di dalam sebuah bak kaca. Ikan-ikan ini berpikir bak mereka ekuivalen dengan realitas. Nah, bayangkan citra holografis 2-dimensi ikan-ikan ini yang diproyeksikan ke atas permukaan bak kaca. Citra ini mengandung replika persis ikan asli, kecuali bahwa mereka berbentuk flat. Setiap pergerakan yang dibuat oleh ikan di bak kaca tercerminkan melalui citra flat di permukaan bak kaca. Ikan yang berenang di bak kaca maupun ikan flat yang hidup di permukaan bak menganggap bahwa diri mereka adalah ikan nyata, bahwa yang lain adalah ilusi. Kedua [kelompok] ikan hidup dan bertindak seolah-olah mereka adalah ikan sungguhan. Deskripsi mana yang benar? Sebetulnya, dua-duanya benar, sebab mereka secara matematis ekuivalen dan tak bisa dibedakan.

Yang membangkitkan gairah teoris string adalah fakta bahwa ruang anti-de Sitter lima-dimensi relatif mudah dikalkulasi, sementara teori medan empat-dimensi terkenal sulit ditangani. (Hari ini pun, setelah bekerja keras selama berdekade-dekade, komputer tercanggih kita tidak bisa memecahkan model quark empat-dimensi dan mendapatkan massa proton dan neutron. Persamaan untuk quark sendiri hampir dipahami dengan baik, tapi memecahkannya di empat dimensi untuk memperoleh atribut/sifat proton dan neutron telah terbukti lebih sulit dari yang dipikirkan sebelumnya.) Sasarannya adalah mengkalkulasi massa dan atribut proton dan neutron, menggunakan dualitas aneh ini.

Dualitas holografis ini bisa juga memiliki penerapan praktis, seperti pemecahan persoalan informasi dalam fisika *black hole*. Di empat dimensi, teramat sulit untuk membuktikan bahwa informasi tidak hilang manakala kita melemparkan objek ke *black hole*. Tapi ruang demikian merupakan dual untuk dunia 5-dimensi, di mana informasi mungkin takkan pernah hilang. Harapannya adalah bahwa persoalan-persoalan yang sulit ditangani di empat dimensi (seperti persoalan informasi, pengkalkulasian massa model quark, dan seterusnya) pada akhirnya dapat dipecahkan di lima dimensi, di mana matematikanya lebih sederhana. Dan adalah senantiasa mungkin bahwa analogi ini betul-betul merupakan cerminan dunia riil—bahwa kita betul-betul eksis sebagai hologram.

Apakah Alam Semesta Merupakan Program Komputer?

John Wheeler, sebagaimana kita simak sebelumnya, percaya bahwa seluruh realitas fisik dapat direduksi menjadi informasi semata. Bekenstein membawa ide informasi *black hole* selangkah lebih jauh dengan mengajukan pertanyaan: apakah keseluruhan alam semesta adalah program komputer? Apakah kita hanya bit-bit pada CD kosmik?

Pertanyaan tentang apakah kita hidup di sebuah program komputer diangkat secara brilian ke layar kaca dalam film *The Matrix*, di mana para alien telah mereduksi semua realitas fisik menjadi program komputer. Miliaran manusia menganggap diri mereka menjalani kehidupan sehari-hari, lupa akan fakta bahwa semua ini adalah fantasi yang dihasilkan komputer, sementara tubuh riil mereka tertidur dalam pembuluh kacang-kacangan, di mana para alien menggunakannya sebagai sumber tenaga.

Dalam film itu, menjalankan program komputer lebih kecil yang dapat menciptakan minirealitas artifisial adalah sesuatu yang mungkin. Bila seseorang ingin menjadi master kung fu atau pilot helikopter, dia cukup memasukkan CD ke komputer, programnya diumpan ke dalam otak kita, dan *presto*! dia secara instan mempelajari keterampilan rumit ini. Selagi CD berjalan, tercipta subrealitas yang seluruhnya baru. Tapi itu menimbulkan pertanyaan yang menggugah rasa ingin tahu: bisakah seluruh realitas ditempatkan pada sebuah CD? Kekuatan komputer yang diperlukan untuk mensimulasikan realitas untuk miliaran manusia tidur sungguh mengagetkan. Tapi secara teori: bisakah keseluruhan alam semesta didigitalisasi dalam

program komputer yang terbatas?

Akar pertanyaan ini berasal dari hukum gerak Newton, dengan penerapan sangat praktis untuk perniagaan dan kehidupan kita. Mark Twain terkenal atas pernyataan, "Setiap orang mengeluhkan cuaca, tapi tak ada seorang pun yang pernah melakukan sesuatu terkait hal itu." Peradaban modern tidak dapat mengubah arah satu badai guruh pun, tapi fisikawan telah mengajukan pertanyaan yang lebih sederhana: bisakah kita memprediksi cuaca? Bisakah program komputer dirancang agar memprediksi pola cuaca kompleks di Bumi? Ini memiliki penerapan sangat praktis sebab semua orang sangat konsern akan cuaca, dari petani yang ingin tahu kapan waktunya untuk memanen hasil bumi hingga meteorologis yang ingin tahu arah pemanasan global di abad ini.

Secara prinsip, komputer dapat menggunakan hukum gerak Newton untuk mengkomputasi molekul penyusun cuaca dengan akurasi hampir acak. Tapi prakteknya, program komputer teramat mentah dan tidak dapat diandalkan dalam memprediksi cuaca melebihi, paling banter, beberapa hari atau lebih. Untuk memprediksi cuaca, seseorang harus menentukan gerakan setiap molekul udara—sesuatu yang jauh di luar jangkauan komputer tercanggih kita; terdapat pula persoalan teori *chaos* dan *"butterfly effect"*, di mana getaran kecil dari sayap seekor kupu-kupu pun bisa menimbulkan efek riakan yang, pada titik waktu kunci, dapat mengubah cuaca sampai sejauh ratusan mil.

Matematikawan merangkum situasi ini dengan menyatakan bahwa

model terkecil yang bisa secara akurat menguraikan cuaca adalah cuaca itu sendiri. Daripada memikroanalisa setiap molekul, hal terbaik yang dapat kita lakukan adalah mencari estimasi cuaca esok dan juga kecenderungan dan pola yang lebih besar (seperti efek rumah kaca).

Jadi teramat sulit untuk mereduksi dunia ala Newton menjadi program komputer, karena tidak terdapat terlalu banyak variabel dan terlalu banyak "kupu-kupu". Tapi di dunia quantum, hal-hal aneh terjadi.

Bekenstein, sebagaimana telah kita simak, menunjukkan bahwa kandungan total informasi sebuah *black hole* adalah proporsional dengan area permukaan horison peristiwanya. Ada cara intuitif untuk memahami ini. Banyak fisikawan percaya bahwa jarak terkecil adalah panjang Planck 10^{-33} cm. Pada jarak luar biasa kecil ini, ruang-waktu tak lagi halus melainkan "berbuih", menyerupai sebuihan gelembung. Kita bisa membagi-bagi permukaan bundar horison menjadi persegi-persegi kecil, masing-masing seukuran panjang Planck. Jika masing-masing persegi ini mengandung satu bit informasi, dan kita menambahkan semua persegi, kita mendapatkan kurang-lebih kandungan total informasi *black hole*. Ini mengindikasikan bahwa tiap-tiap "persegi Planck" ini adalah unit informasi terkecil. Bila ini benar, maka, klaim Bekenstein, informasi barangkali merupakan bahasa sejati fisika, bukan teori medan. Sebagaimana ucapannya, "Teori medan, dengan ketakterhinggaannya, tidak dapat menjadi teori final."

Sejak karya Michael Faraday di abad 19, fisika dirumuskan dalam

bahasa medan-medan, yang halus dan berketerusan, dan yang mengukur kekuatan magnetisme, listrik, dan gravitasi, dan seterusnya di setiap titik di ruang-waktu. Tapi teori medan didasarkan pada struktur berketerusan, bukan struktur terdigitalisasi. Sebuah medan dapat menduduki harga berapa pun, sementara bilangan digital hanya bisa mewakili bilangan tersendiri berbasis 0 dan 1. Inilah perbedaan, misalnya, antara tilam karet halus dalam teori Einsteln dan jala kabel halus. Tilam karet bisa dibagi-bagi menjadi titik-titik dalam jumlah tak terhingga, sedangkan jala kabel memiliki jarak yang kecil, panjang jala.

Bekenstein menyatakan bahwa "sebuah teori final tidak harus menyangkut medan, pun tidak ruangwaktu, tapi lebih menyangkut pertukaran informasi di antara proses-proses fisikal."

Jika alam semesta bisa didigitalisasi dan direduksi menjadi 0 dan 1, lantas berapa kandungan total informasi alam semesta? Bekenstein mengestimasi bahwa sebuah *black hole* berdiameter sekitar 1 cm dapat menampung 10^{66} bit informasi. Tapi bila sebuah objek seukuran 1 cm dapat memuat bit informasi sebanyak itu, maka, estimasinya, alam semesta tampak (*visible universe*) mungkin mengandung informasi yang jauh lebih banyak, tak kurang dari 10^{100} bit informasi (yang pada prinsipnya bisa dijejal ke dalam bola berdiameter sepersepuluh tahun-cahaya. Angka kolosal ini, 1 diikuti 100 nol, disebut 1 google.)

Jika gambaran ini benar, kita menghadapi situasi yang aneh. Ini mungkin berarti bahwa sementara dunia Newton tidak dapat

disimulasikan oleh komputer (atau hanya dapat disimulasikan oleh sistem sebesar dirinya), di dunia quantum, barangkali alam semesta sendiri dapat ditaruh ke dalam CD! Secara teori, bila kita bisa menaruh 10^{100} bit informasi pada CD, kita bisa menyaksikan setiap peristiwa di alam semesta kita terhampar di ruang tinggal kita. Secara prinsip, seseorang dapat menyusun atau memprogram ulang bit-bit pada CD ini, sehingga realitas fisik berjalan dengan cara berbeda. Sedikit banyak, seseorang akan mempunyai kemampuan mirip Tuhan untuk menulis ulang naskah.

(Bekenstein juga mengakui bahwa kandungan total informasi alam semesta boleh jadi jauh lebih besar dari itu. Kenyataannya, volume terkecil yang dapat menampung informasi alam semesta adalah ukuran alam semesta itu sendiri. Jika ini benar, maka kita sedang kembali ke tempat kita memulai: sistem terkecil yang dapat memodelkan/meniru alam semesta adalah alam semesta sendiri.)

Namun, teori string menyodorkan interpretasi yang sedikit berbeda mengenai "jarak terkecil" dan apakah kita bisa mendigitalisasi alam semesta pada CD. Teori-M mempunyai apa yang disebut dualitas-T. Ingat, filsuf Yunani, Zeno, berpikir bahwa sebuah garis bisa dibagi menjadi titik-titik tak terhingga, tanpa batas. Hari ini, fisikawan quantum seperti Bekenstein percaya bahwa jarak terkecil ialah jarak Planck 10^{-33} cm, di mana struktur ruang-waktu menjadi berbuih dan bergelembung. Tapi teori-M memberi kita corak baru. Katakanlah kita mengambil teori string dan membungkus satu dimensi menjadi lingkaran berjari-jari R. Lalu kita ambil string lain dan membungkus

satu dimensi menjadi lingkaran berjari-jari $1/R$. Dengan membandingkan dua teori yang sungguh berbeda ini, kita mendapati bahwa mereka persis sama.

Sekarang asumsikan R luar biasa kecil, jauh lebih kecil dari panjang Planck. Ini berarti fisika dalam panjang Planck identik dengan fisika di luar panjang Planck. Pada panjang Planck, ruang-waktu mungkin menjadi bergumpal dan berbuih, tapi fisika di dalam panjang Planck dan fisika pada jarak sangat besar bisa halus dan kenyataannya identik.

Dualitas ini pertama kali ditemukan pada 1984 oleh kolega lama saya, Keiji Kikkawa, beserta mahasiswanya, Masami Yamasaki, dari Universitas Osaka. Walaupun teori string nampaknya berkesimpulan bahwa terdapat "jarak terkecil", panjang Planck, fisika tidak lantas berakhir pada panjang Planck. Corak barunya ialah bahwa fisika yang jauh lebih kecil dari panjang Planck adalah ekuivalen dengan fisika yang jauh lebih besar dari panjang Planck.

Jika interpretasi yang agak tunggang balik ini benar, maka artinya dalam "jarak terkecil" teori string pun, keseluruhan alam semesta bisa eksis. Dengan kata lain, kita masih bisa memakai teori medan, dengan strukturnya yang berketerusan (tidak terdigitalisasi), untuk menguraikan alam semesta bahkan sampai jarak dalam energi Planck. Jadi barangkali alam semesta bukanlah program komputer sama sekali. Suatu saat, seiring persoalan ini terumuskan dengan baik, waktu akan memberitahu.

(Dualitas-T ini merupakan justifikasi untuk skenario *big bang*

Veneziano yang saya sebutkan sebelumnya. Dalam model tersebut, sebuah *black hole* kolaps sampai mencapai panjang Planck dan kemudian "melambung" kembali menjadi *big bang*. Lambungan ini bukanlah peristiwa mendadak, melainkan dualitas-T halus antara *black hole* yang lebih kecil dari panjang Planck dan alam semesta mengembang yang lebih besar dari panjang Planck.)

Tamat?

Jika teori-M sukses, jika ia betul-betul *theory of everything*, apakah itu berarti akhir fisika?

Jawabannya tidak. Izinkan saya memberi contoh. Sekalipun kita mengetahui aturan catur, itu tidak lantas menjadikan kita *grand master*. Demikian halnya, mengetahui hukum alam semesta tidak berarti bahwa kita adalah *grand master* dalam hal memahami keanekaragaman solusinya yang kaya.

Secara pribadi, saya pikir mungkin masih sedikit prematur untuk menerapkan teori-M pada kosmologi, walaupun ia memberi kita gambaran baru dan mengejutkan mengenai cara alam semesta berawal. Persoalan utamanya, saya pikir, adalah bahwa modelnya belum dalam bentuk final. Teori-M mungkin benar bisa menjadi *theory of everything*, tapi saya percaya ia masih jauh dari selesai. Teori ini telah berkembang terbalik sejak 1968, dan persamaan finalnya masih belum ditemukan. (Contohnya, teori string dapat dirumuskan lewat teori string medan, seperti yang saya dan Kikkawa tunjukkan bertahun-tahun silam. Bandingan persamaan untuk teori-M belum

diketahui.)

Beberapa persoalan dihadapi teori-M. Salah satunya adalah bahwa fisikawan kini tengah tenggelam dalam bran-*p*. Serangkaian makalah telah ditulis untuk mencoba mengkatalogkan keanekaragaman membran yang membingungkan yang bisa eksis di dimensi berbeda-beda. Terdapat membran berbentuk seperti donat berlubang, donat berlubang banyak, yang berinterseksi dengan membran-membran, dan seterusnya.

Saya teringat akan apa yang terjadi saat tiga orang bijak buta merundingkan gajah. Menyentuh gajah di tempat berlainan, masing-masing mendapat teorinya sendiri. Orang bijak pertama, menyentuh ekor, mengatakan bahwa gajah adalah bran-satu (sebuah string). Orang bijak kedua, menyentuh telinga, mengatakan bahwa gajah adalah bran-dua (sebuah membran). Terakhir, orang bijak ketiga berkata bahwa keduanya salah. Menyentuh kaki, yang terasa seperti batang pohon, orang bijak ketiga mengatakan bahwa gajah adalah betul-betul bran-tiga. Karena mereka semua buta, mereka tidak dapat melihat gambaran besarnya, bahwa jumlah total bran-satu, bran-dua, dan bran-tiga tak lain adalah 1 binatang, seekor gajah.

Demikian halnya, sulit untuk percaya bahwa ratusan membran yang ditemukan dalam teori-M adalah fundamental. Saat ini, kita tak punya pemahaman teori-M yang komprehensif. Menurut sudut pandang saya sendiri, yang telah menuntun penelitian saya sekarang, membran-membran dan string-string ini melambangkan "kondensasi" ruang. Einstein mencoba menguraikan materi dari segi geometri

murni, sebagai suatu jenis kekusutan di struktur ruang-waktu. Bila kita mempunyai seprei kasur, misalnya, dan timbul kekusutan, kekusutan tersebut bertindak seolah-olah memiliki kehidupannya sendiri. Einstein mencoba memodelkan elektron dan partikel unsur lainnya sebagai suatu jenis disturbansi di geometri ruang-waktu. Walaupun dia akhirnya gagal, ide ini dapat dihidupkan kembali pada level lebih tinggi dalam teori-M.

Saya percaya Einstein ada di jalur yang benar. Idenya adalah membangkitkan fisika subatom lewat geometri. Daripada mencoba menemukan analog geometri untuk partikel titik, yang merupakan strategi Einstein, seseorang dapat merevisinya dan mencoba menyusun analog geometri string dan membran yang terbentuk dari ruang-waktu semata.

Cara untuk mengetahui logika pendekatan ini adalah dengan memeriksa fisika secara historis. Di masa lalu, setiap kali fisikawan dihadapkan dengan spektrum objek, kita menyadari bahwa ada sesuatu yang lebih fundamental pada akarnya. Contoh, ketika kita menemukan menemukan garis-garis spektrum yang dipancarkan dari gas hidrogen, kita akhirnya menyadari bahwa mereka berasal dari atom, dari lompatan quantum yang dilakukan oleh elektron sewaktu mengedari nukleus. Demikian halnya, saat dihadapkan dengan perkembangbiakan jumlah partikel kuat pada 1950-an, fisikawan akhirnya menyadari bahwa partikel-partikel itu tak lain adalah status wajib quark. Dan saat dihadapkan dengan perkembangbiakan jumlah quark dan partikel "unsur" lainnya dalam Standard Model, sebagian

besar fisikawan kini percaya bahwa mereka timbul dari vibrasi string.

Dengan teori-M, kita dihadapkan dengan perkembangbiakan jumlah bran-*p* dari semua tipe dan variasi. Sulit dipercaya bahwa ini bisa fundamental, sebab ada terlalu banyak bran-*p*, dan sebab mereka bersifat tak stabil dan divergen. Solusi lebih sederhana, yang serasi dengan pendekatan historis, adalah mengasumsikan bahwa teori-M berasal dari paradigma yang lebih sederhana lagi, barangkali geometri itu sendiri.

Dalam rangka menjawab pertanyaan fundamental ini, kita harus mengetahui prinsip fisika yang mendasari teori tersebut, tak hanya matematikanya yang misterius. Sebagaimana kata fisikawan Brian Greene, "Sekarang ini, teoris string ada dalam posisi yang serupa dengan kehilangan Einstein atas prinsip keekuivalenan. Sejak taksiran Veneziano yang mendalam pada 1968, teori ini telah dirangkai bersama, penemuan demi penemuan, revolusi demi revolusi. Tapi prinsip penyusun sentral yang merangkul penemuan-penemuan ini dan semua fitur lain teori tersebut dalam satu kerangka sistematis dan mencakup segala hal—kerangka yang membuat eksistensi tiap-tiap bahan menjadi multak tak terelakkan—masih belum didapat. Penemuan prinsip ini akan menandai momen amat penting dalam perkembangan teori string, sebab kemungkinan besar akan mengungkap cara berpikir inti teori tersebut dengan kejernihan yang tidak diduga sebelumnya."

Ini juga akan membuat jutaan solusi yang sampai sekarang ditemukan untuk teori string menjadi dapat dimengerti, yang masing-

masingnya melambangkan alam semesta konsisten. Di masa lalu diyakini bahwa, dari belantara solusi ini, hanya satu yang melambangkan solusi sejati teori string. Sejauh ini, mustahil memilih satu dari jutaan [solusi] alam semesta yang telah ditemukan sampai sekarang. Tumbuh opini yang menyatakan bahwa bila kita tidak bisa menemukan solusi tunggal untuk teori string, kemungkinan tidak ada solusi sama sekali. Semua solusi adalah setara. Terdapat multiverse berisi alam semesta-alam semesta, masing-masingnya konsisten dengan seluruh hukum fisika. Ini kemudian membawa kita pada apa yang disebut prinsip antropik dan kemungkinan "alam semesta diciptakan".

Bab 8
Alam Semesta Diciptakan?

> Banyak alam semesta mungkin telah dirusak dan dikerjakan serampangan di sepanjang waktu yang lama, sebelum sistem ini dicoret; banyak buruh hilang, banyak percobaan tak berhasil, dan perbaikan lambat tapi berkesinambungan dijalankan selama masa tak terhingga dalam seni membuat dunia.
>
> —David Hume

Saat duduk di kelas dua SD, guru saya mengeluarkan ucapan sambil lalu yang takkan pernah saya lupakan. Dia bilang, "Tuhan begitu menyayangi bumi, sehingga Dia menaruh bumi di jarak yang tepat dari matahari." Sebagai anak umur 6 tahun, saya terkejut oleh kesederhanaan dan kekuatan argumen ini. Bila Tuhan menaruh Bumi terlalu jauh dari Matahari, maka lautan akan membeku. Bila Dia menaruh Bumi terlalu dekat, maka lautan akan menguap. Menurut guru saya itu, ini berarti Tuhan tak hanya eksis, tapi Dia juga baik hati, begitu menyayangi Bumi sehingga Dia menaruhnya di jarak yang tepat dari Matahari. Itu memberi dampak mendalam terhadap saya.

Hari ini, ilmuwan mengatakan bahwa Bumi tinggal di "zona Goldilocks" dari Matahari, cukup jauh sehingga cairan, "pelarut

universal", dapat eksis untuk menciptakan bahan kimiawi kehidupan. Jika Bumi lebih jauh dari Matahari, ia mungkin menjadi seperti Mars, "gurun membeku", di mana temperaturnya telah menghasilkan permukaan tandus kasar di mana air dan bahkan karbon dioksida seringkali membeku padat. Bahkan di bawah tanah Mars, seseorang menemukan *permafrost*, lapisan permanen air beku.

Jika Bumi terlalu dekat dengan Matahari, maka ia mungkin menjadi lebih seperti Venus, yang hampir identik dengan Bumi dalam hal ukuran tapi dikenal sebagai "planet rumah kaca". Karena Venus begitu dekat dengan Matahari, dan atmosfernya terbuat dari karbon dioksida, energi cahaya matahari ditangkap oleh Venus, menyebabkan temperatur membumbung sampai 900 derajat Fahrenheit. Lantaran hal ini, Venus merupakan planet terpanas, secara rata-rata, di tata surya. Dengan hujan asam sulfur, tekanan atmosfernya seratusan kali lebih besar daripada di Bumi, dan dengan temperatur amat panas, Venus barangkali merupakan planet terjahat di tata surya, sebagian besar lantaran ia lebih dekat dengan Matahari dibanding Bumi.

Menganalisa argumen guru kelas dua saya, ilmuwan akan mengatakan bahwa pernyataannya itu adalah contoh prinsip antropik, yang menyatakan bahwa hukum alam disusun supaya kehidupan dan kesadaran menjadi mungkin. Apakah hukum-hukum ini disusun oleh suatu rancangan besar atau kebetulan, ini telah menjadi subjek banyak perdebatan, terutama pada tahun-tahun belakangan, lantaran ditemukannya banyak "kecelakaan" atau kebetulan yang memungkinkan kehidupan dan kesadaran. Bagi beberapa ilmuwan, ini adalah

bukti adanya tuhan yang sengaja menyusun hukum alam untuk memungkinkan kehidupan, dan kita. Tapi bagi ilmuwan lain, itu artinya kita merupakan produk sampingan serangkaian kecelakaan mujur. Atau barangkali, bila seseorang mempercayai percabangan inflasi dan teori-M, terdapat multiverse berisi alam semesta-alam semesta.

Untuk memahami kompleksitas argumen-argumen ini, pertama-tama pikirkan kebetulan-kebetulan yang memungkinkan kehidupan di Bumi. Kita tak hanya tinggal di zona Goldilocks Matahari, kita juga tinggal di serangkaian zona Goldilocks lain. Contoh, Bulan kita berukuran tepat untuk menstabilkan orbit Bumi. Jika Bulan jauh lebih kecil, perturbasi kecil pun dalam putaran Bumi akan secara perlahan berakumulasi setelah ratusan juta tahun, menyebabkan Bumi terhuyung-huyung menimbulkan malapetaka dan menciptakan perubahan drastis pada iklim sehingga membuat kehidupan menjadi mustahil. Program komputer menunjukkan bahwa tanpa Bulan yang besar (sekitar sepertiga ukuran Bumi), poros Bumi bisa bergeser sebanyak 90 derajat setelah periode jutaan tahun. Karena ilmuwan percaya pembentukan DNA memerlukan stabilitas iklim selama ratusan juta tahun, sebuah Bumi yang secara periodik berjungkir-balik pada porosnya akan menciptakan perubahan cuaca yang katastropis, membuat pembentukan DNA menjadi mustahil. Untunglah, Bulan kita berukuran "tepat" untuk menstabilkan orbit Bumi, sehingga malapetaka semacam itu tidak akan terjadi. (Bulan-bulan Mars tidak cukup besar untuk menstabilkan putarannya. Alhasil, Mars lambat-

laun mulai memasuki era instabilitas lagi. Di masa lalu, astronom percaya, Mars pernah terhuyung pada porosnya sebanyak 45 derajat.)

Disebabkan oleh gaya tidal kecil, Bulan juga bergerak menjauhi Bumi pada laju sekitar 4 cm per tahun; dalam sekitar 2 miliar tahun lagi, ia akan terlalu jauh untuk menstabilkan putaran Bumi. Ini bisa menjadi malapetaka bagi kehidupan di Bumi. Miliaran tahun dari sekarang, langit malam tidak hanya akan tak berbulan, kita juga mungkin akan melihat serangkaian rasi yang sama sekali berbeda, karena Bumi terguling di orbitnya. Cuaca di Bumi tak akan dikenali lagi, membuat kehidupan menjadi mustahil.

Geolog Peter Ward dan astronom Donald Brownlee dari Universitas Washington menulis, "Tanpa Bulan, tidak akan ada cahaya bulan, tidak ada kalender, tidak ada kegilaan, tidak ada program Apollo, sedikit syair, dan dunia setiap malamnya gelap dan suram. Tanpa Bulan, kemungkinan besar juga tidak ada burung, *redwood*[17], ikan paus, *trilobite*[18], atau kehidupan maju lainnya yang akan pernah menyemarakkan bumi."

Demikian pula, model komputer tata surya kita menunjukkan bahwa kehadiran planet Yupiter di tata surya kita mujur bagi kehidupan di Bumi, sebab gravitasinya yang besar membantu meng-hempaskan asteroid ke angkasa luar. Diperlukan hampir semiliar tahun, selama "zaman meteor", yang terbentang dari 3,5 miliar sampai 4-5 miliar tahun silam, untuk "membersihkan" tata surya kita dari puing-puing asteorid dan komet yang tersisa dari pembentukannya.

17 Pohon jarum California yang sangat besar dan menghasilkan kayu merah—penj.

18 Sejenis fosil arthropoda laut—penj.

Seandainya Yupiter jauh lebih kecil dan gravitasinya jauh lebih lemah, maka tata surya kita akan masih dipenuhi asteroid, membuat kehidupan di Bumi menjadi mustahil, sebab asteroid terjun ke lautan kita dan memusnahkan kehidupan. Karenanya, Yupiter juga berukuran tepat.

Kita juga tinggal di zona Goldilocks kelompok planet. Seandainya Bumi sedikit lebih kecil, gravitasinya akan begitu lemah sehingga tidak dapat memelihara oksigennya. Seandainya terlalu besar, ia akan menahan banyak gas primordial beracun, membuat kehidupan menjadi mustahil. Bumi memiliki berat "tepat" untuk memelihara komposisi atmosfer yang menguntungkan bagi kehidupan.

Kita juga tinggal di zona Goldilocks orbit planet yang dapat dilalui. Yang luar biasa, orbit planet-planet lain, kecuali Plato, semuanya hampir sirkuler, artinya tubrukan planet sungguh langka di tata surya. Ini berarti Bumi tidak akan berdekatan dengan raksasa-raksasa gas, yang gravitasinya bisa dengan mudah mengacaukan orbit Bumi. Ini, sekali lagi, bagus untuk kehidupan, yang memerlukan stabilitas selama ratusan juta tahun.

Demikian pula, Bumi juga eksis di zona Goldilocks galaksi Bima Sakti, sekitar dua pertiga jalan dari pusatnya. Seandainya tata surya terlalu dekat dengan pusat galaksi, di mana sebuah *black hole* bersembunyi, medan radiasi akan begitu kuat sehingga kehidupan menjadi mustahil. Dan seandainya tata surya terlalu jauh, tidak akan ada cukup unsur tinggi untuk menciptakan unsur-unsur kehidupan yang dibutuhkan.

Ilmuwan bisa menyediakan banyak contoh di mana Bumi terletak di banyak zona Goldilocks. Astronom Ward dan Brownlee berargumen bahwa kita tinggal di begitu banyak pita tipis atau zona Goldilocks sehingga barangkali kehidupan berakal di bumi ialah satu-satunya di galaksi ini, bahkan mungkin di alam semesta. Mereka membacakan daftar luar biasa bahwa Bumi mempunyai "ketepatan" jumlah lautan, lempeng tektonik, kandungan oksigen, kandungan panas, kemiringan poros, dan seterusnya untuk menciptakan kehidupan berakal. Seandainya Bumi berada di luar salah satu pita tipis saja, kita tidak akan berada di sini untuk membahas pertanyaan.

Apakah Bumi ditempatkan di tengah-tengah semua zona Goldilocks ini karena Tuhan menyayanginya? Mungkin. Namun, kita bisa mencapai kesimpulan yang tidak bersandar pada ketuhanan. Barangkali ada jutaan planet mati di ruang angkasa *yang* terlalu dekat dengan matahari mereka, yang bulan-bulannya terlalu kecil, yang Yupiter-yupiternya terlalu kecil, atau yang terlalu dekat dengan pusat galaksi mereka. Eksistensi zona Goldilocks berkenaan dengan Bumi tidak harus berarti bahwa Tuhan telah melimpahkan berkat istimewa kepada kita; itu mungkin hanyalah kebetulan, satu contoh langka di antara jutaan planet mati di ruang angkasa yang terletak di luar zona Goldilocks.

Filsuf Yunani, Democritus, yang menghipotesiskan eksistensi atom, menulis, "Ada dunia dengan jumlah tak terhingga dan ukuran berlainan. Di beberapa dunia tersebut tidak terdapat matahari ataupun bulan. Di dunia lainnya terdapat lebih dari satu matahari dan

bulan. Jarak antara dunia-dunia itu tidak sama, di beberapa arah ada lebih banyak...Kemusnahan mereka terjadi melalui tubrukan dengan satu sama lain. Beberapa dunia miskin dari hewan dan kehidupan tanaman dan dari kelembaban."

Pada 2002, kenyataannya, astronom menemukan seratusan planet ekstrasurya yang mengorbit bintang lain. Planet ekstrasurya ditemukan sebanyak satu planet setiap 2 minggu atau lebih. Karena planet ekstrasurya tidak mengeluarkan cahaya mereka sendiri, astronom mengidentifikasi mereka lewat beragam cara tak langsung. Yang paling handal ialah dengan mencari keterhuyungan bintang induk, yang bergerak mundur dan maju sewaktu planetnya yang seukuran Yupiter mengedarinya. Dengan menganalisa pergeseran Doppler pada cahaya yang dipancarkan dari bintang terhuyung tersebut, seseorang bisa mengkalkulasi seberapa cepat bintang itu bergerak dan menggunakan hukum Newton untuk mengkalkulasi massa planetnya.

"Anda dapat membayangkan bintang dan planet besar sebagai pasangan dansa, berputar sambil berpegangan tangan mereka yang terulur. Partner kecil di sebelah luar bergerak lebih jauh dalam lingkaran besar, sementara partner besar di sebelah dalam hanya menggerakkan kakinya dalam lingkaran sangat kecil—pergerakan mengelilingi lingkaran amat kecil ini adalah 'keterhuyungan' yang kita lihat pada bintang-bintang ini," kata Chris McCarthy dari Carnegie Institution. Proses ini kini begitu akurat sehingga kita bisa mendeteksi pergantian kecepatan 3 meter per detik (kecepatan jalan cepat) pada

sebuah bintang yang jauhnya ratusan tahun-cahaya.

Metode-metode lain yang lebih cerdik tengah diusulkan untuk menemukan lebih banyak planet lagi. Salah satunya adalah mencari sebuah planet saat ia memudarkan bintang induk, yang mengakibatkan penurunan tipis pada kecerlangannya selagi planet melintas di depan bintang tersebut. Dan dalam 15 sampai 20 tahun ke depan, NASA akan mengirim satelit antariksa *interferometry*-nya ke orbit, yang akan sanggup menemukan planet-planet mirip Bumi yang lebih kecil di luar angkasa. (Karena kecerlangan bintang induk membanjiri planet, satelit ini akan memanfaatkan interferensi cahaya untuk menetralkan halo bintang induk yang intens, membuat planet mirip Bumi tersebut tidak samar/kabur.)

Sejauh ini, tak satu pun planet ekstrasurya seukuran Yupiter yang kita temukan menyerupai Bumi kita, dan semuanya barangkali telah mati. Astronom menemukan mereka di orbit sangat eksentrik atau di orbit yang amat dekat dengan bintang induk mereka; dalam kedua kasus tersebut, sebuah planet mirip Bumi di zona Goldilocks akan mustahil [ditemukan]. Di tata surya-tata surya ini, planet seukuran Yupiter akan melintasi zona Goldilocks dan menghempaskan planet kecil seukuran Bumi ke angkasa luar, mencegah kehidupan terbentuk.

Orbit-orbit amat eksentrik adalah lumrah di ruang angkasa—begitu lumrah, kenyataannya, sampai-sampai ketika sebuah tata surya "normal" ditemukan di ruang angkasa, itu masuk tajuk utama pada 2003. Astronom-astronom di AS dan Australia sama-sama menggembar-gemborkan penemuan sebuah planet seukuran Yupiter

yang mengorbit bintang HD 70642. Yang begitu tak biasa dari planet ini (sekitar dua kali ukuran Yupiter kita) adalah bahwa ia berada di orbit sirkuler dengan rasio [jarak] yang kurang lebih sama dengan [jarak] Yupiter kita ke matahari.

Di masa mendatang, bagaimanapun, astronom semestinya mampu mengkatalogkan semua bintang dekat untuk tata surya-tata surya potensial. "Kami sedang bekerja untuk mensurvey 2.000 bintang terdekat mirip matahari, yang semuanya berjarak hingga 150 tahun-cahaya," kata Paul Butler dari Carnegie Institution of Washington, yang terlibat dalam penemuan pertama sebuah planet ekstrasurya pada tahun 1995. "Sasaran kami ada dua; untuk menyediakan pengintaian (sensus pertama) tetangga-tetangga terdekat kita di ruang angkasa, dan untuk menyediakan data pertama untuk menghadapi persoalan fundamental, seberapa lumrah atau seberapa langka tata surya yang kita miliki," katanya.

Kebetulan Kosmik

Untuk terbentuknya kehidupan, planet kita harus relatif stabil selama ratusan juta tahun. Tapi dunia yang stabil selama ratusan juta tahun luar biasa sulit untuk dibuat.

Diawali dengan cara atom dibuat, dengan fakta bahwa proton sedikit lebih ringan daripada neutron. Artinya neutron pada akhirnya meluruh menjadi proton, yang menduduki status energi lebih rendah. Jika proton lebih berat 1 persen saja, ia akan meluruh menjadi neutron, dan semua nukleus akan menjadi tak stabil dan berdis-

integrasi. Atom-atom akan lari berpisahan, membuat kehidupan menjadi mustahil.

Kebetulan kosmik yang memungkinkan terbentuknya kehidupan ialah bahwa proton bersifat stabil dan tidak meluruh menjadi antielektron. Eksperimen-eksperimen menunjukkan bahwa masa hidup proton sungguh-sungguh panjang, jauh lebih panjang dari masa hidup alam semesta. Untuk pembentukan DNA stabil, proton harus stabil selama sekurangnya ratusan juta tahun.

Jika gaya nuklir kuat sedikit lebih lemah, nukleus seperti deuterium akan lari berpisahan, dan tak ada satu pun unsur alam semesta yang bisa dibangun secara berturut-turut di interior bintang melalui nukleosintesis. Jika gaya nuklir tersebut sedikit lebih kuat, bintang-bintang akan membakar bahan bakar nuklir mereka terlalu cepat, dan kehidupan tidak bisa berkembang.

Jika kita mengubah-ubah kekuatan gaya nuklir lemah, kita juga mendapati bahwa kehidupan akan, sekali lagi, mustahil. Neutrino, yang bertindak lewat gaya nuklir lemah, sangat krusial untuk mengangkut energi ke luar dari supernova yang meledak. Energi ini, pada gilirannya, bertanggung jawab atas pembentukan unsur lebih tinggi selain besi. Jika gaya nuklir lemah sedikit lebih lemah, neutrino hampir tidak akan berinteraksi sama sekali, berarti supernova tidak dapat membentuk unsur-unsur selain besi. Jika gaya nuklir lemah sedikit lebih kuat, neutrino tidak dapat melarikan diri secara tepat dari inti bintang, lagi-lagi mencegah pembentukan unsur lebih tinggi yang menyusun tubuh kita dan dunia kita.

Ilmuwan, nyatanya, telah merangkai daftar panjang "kebetulan kosmik menggembirakan" semacam itu. Ketika dihadapkan dengan daftar menakjubkan ini, sungguh mengejutkan mendapati betapa banyaknya konstanta familiar alam semesta di pita amat tipis yang memungkinkan kehidupan. Bila satu saja dari kebetulan ini berubah, bintang-bintang takkan pernah terbentuk, alam semesta akan terbang berpisahan, DNA tidak akan eksis, kehidupan yang kita kenal akan menjadi mustahil, Bumi akan terbalik atau membeku, dan seterusnya.

Astronom Hugh Ross, untuk menekankan betapa sungguh luar biasanya situasi ini, menyamakannya dengan terangkainya pesawat Boeing sebagai hasil dari tornado yang menghantam tempat barang rongsokan.

Prinsip Antropik

Sekali lagi, semua argumen yang dihadirkan di atas disatukan di bawah prinsip antropik. Terdapat beberapa sudut pandang yang bisa diambil oleh seseorang menyangkut prinsip kontroversial ini. Guru kelas dua saya merasa bahwa kebetulan-kebetulan menggembirakan ini mengimplikasikan eksistensi rancangan atau rencana besar. Sebagaimana Freeman Dyson pernah katakan, "Seolah-olah alam semesta telah tahu kita akan datang." Ini merupakan contoh prinsip antropik kuat, ide bahwa penyetelan konstanta fisikal bukanlah kebetulan tapi mengimplikasikan suatu jenis rancangan. (Prinsip antropik lemah hanya menyatakan bahwa konstanta fisikal alam semesta adalah sedemikian rupa sehingga memungkinkan kehidupan

dan kesadaran.)

Fisikawan Don Page meringkas berbagai bentuk prinsip antropik yang telah diajukan selama bertahun-tahun:

Prinsip antropik lemah: "Apa yang kita amati di alam semesta dibatasi oleh persyaratan eksistensi kita sebagai pengamat."

Prinsip antropik kuat-lemah: "Di, sekurangnya, satu dunia...dari alam semesta banyak-dunia, kehidupan pasti berkembang."

Prinsip antropik kuat: "Alam semesta pasti mempunyai sifat untuk berkembangnya kehidupan di suatu waktu di dalamnya."

Prinsip antropik final: "Keberakalan pasti berkembang di alam semesta dan sejak saat itu tak pernah padam."

Fisikawan yang mengambil prinsip antropik kuat secara serius, dan mengklaim bahwa itu merupakan tanda keberadaan Tuhan, adalah Vera Kistiakowsky, fisikawan di MIT. Dia mengatakan, "Keteraturan menawan yang diperlihatkan oleh pemahaman kita atas dunia fisik menuntut adanya ketuhanan." Ilmuwan yang menyokong opini tersebut adalah John Polkinghorne, fisikawan partikel yang berhenti dari kedudukannya di Universitas Cambridge dan menjadi pendeta Gereja Inggris. Dia menulis bahwa alam semesta "bukan hanya 'dunia tua', tapi juga istimewa dan disetel halus untuk kehidupan karena ia merupakan ciptaan Tuhan yang berkehendak demikian." Betul, Isaac Newton sendiri, yang memperkenalkan konsep hukum tetap yang memandu planet-planet dan bintang-bintang tanpa intervensi tuhan, percaya bahwa keeleganan hukum ini mengarah pada eksistensi Tuhan.

Tapi fisikawan dan peraih Nobel, Steven Weinberg, tidak yakin. Dia mengakui daya tarik prinsip antropik: "Hampir tidak tertahankan bagi manusia untuk percaya bahwa kita memiliki suatu hubungan istimewa dengan alam semesta, bahwa kehidupan manusia bukan sekadar hasil jenaka serangkaian kebetulan sejak tiga menit pertama, tapi bahwa kita, dengan suatu cara, dipasang sejak permulaan." Bagaimanapun, dia berkesimpulan bahwa prinsip antropik kuat "sedikit lebih dari sekadar omong-kosong mistis".

Ilmuwan lain juga kurang yakin mengenai kekuatan prinsip antropik. Fisikawan Heinz Pagels pernah terkesan dengan prinsip antropik tapi akhirnya kehilangan minat karena tidak mempunyai kekuatan prediksi. Teorinya tidak bisa diuji, juga tidak ada cara untuk mengggali informasi baru darinya. Malah, prinsip itu menghasilkan arus pengulangan hampa yang tak berujung—bahwa kita ada di sini karena kita ada di sini.

Guth juga mengabaikan prinsip antropik, menyatakan bahwa, "Sulit bagi saya untuk percaya bahwa orang-orang akan menggunakan prinsip antropik seandainya kita mempunyai penjelasan lebih baik atas sesuatu. Saya masih harus, misalnya, mendengar prinsip antropik sejarah dunia... Prinsip antropik adalah sesuatu yang dilakukan orang-orang bila mereka berpikir tidak ada suatu yang lebih baik untuk dilakukan."

Multiverse

Ilmuwan lain, seperti Sir Martin Rees dari Universitas Cambridge,

berpikir bahwa kebetulan-kebetulan kosmik ini memberikan bukti eksistensi multiverse. Rees percaya bahwa satu-satunya cara untuk memecahkan fakta bahwa kita tinggal di pita kecil ratusan "kebetulan" adalah dengan mempostulatkan eksistensi jutaan alam semesta paralel. Di multiverse alam semesta ini, sebagian besar alam semesta telah mati. Protonnya tidak stabil. Atom-atom tak pernah berkondensasi. DNA tak pernah terbentuk. Alam semesta kolaps secara prematur atau membeku hampir secara serta-merta. Tapi di alam semesta kita, serangkaian kebetulan kosmik terjadi, bukan harus lantaran tangan Tuhan, tapi lantaran hukum rata-rata.

Dalam beberapa hal, Sir Martin Rees adalah sosok terakhir yang bisa diharapkan seseorang untuk memajukan ide alam semesta paralel. Dia merupakan Astronomer Royal of England dan mengemban banyak tanggungjawab untuk mewakili pandangan penguasa mengenai alam semesta. Berambut perak, terkemuka, berpakaian rapih, Rees membicarakan keajaiban kosmos sama fasihnya dengan membicarakan urusan masyarakat umum.

Bukanlah kebetulan, dia percaya, bahwa alam semesta disetel halus untuk memperkenankan eksisnya kehidupan. Terdapat terlalu banyak kebetulan untuk beradanya alam semesta di pita sedemikian tipis yang memungkinkan kehidupan. "Penyetelan halus nyata, yang kepadanya eksistensi kita bergantung, boleh jadi kebetulan," tulis Rees. "Dulu saya berpikir demikian. Tapi pandangan tersebut terasa terlalu sempit... Apabila kita menerima ini, beragam fitur istimewa alam semesta kita —yang pernah dikemukakan beberapa teolog sebagai bukti adanya

Tuhan atau rancangan—tidak akan menimbulkan keheranan."

Rees telah mencoba untuk memberikan substansi pada argumennya dengan mengukur beberapa konsep ini. Dia mengklaim bahwa alam semesta kelihatannya diatur oleh enam bilangan, yang masing-masingnya bisa diukur dan disetel halus. Keenam bilangan ini harus memenuhi syarat untuk kehidupan, atau, kalau tidak, mereka menghasilkan alam semesta mati.

Yang pertama adalah Epsilon, yang sama dengan 0,007, yaitu jumlah relatif hidrogen yang berkonversi menjadi helium melalui fusi dalam *big bang*. Jika bilangan ini senilai 0,006 bukan 0,007, ini akan memperlemah gaya nuklir, dan proton dan neutron tidak akan terikat bersama. Deuterium (dengan satu proton dan satu neutron) tidak bisa terbentuk, karenanya unsur lebih berat takkan pernah terbentuk pada bintang-bintang, atom-atom tubuh kita tidak bisa terbentuk, dan seluruh alam semesta akan lenyap menjadi hidrogen. Pengurangan kecil pun pada gaya nuklir akan menciptakan instabilitas dalam tabel periodik unsur, dan akan ada lebih sedikit unsur stabil untuk terbentuknya kehidupan.

Seandainya Epsilon senilai 0,008, maka fusi akan terlalu cepat sehingga tak ada hidrogen yang akan bertahan hidup melewati *big bang*, dan tidak akan ada bintang yang hari ini memberikan energi kepada planet. Atau mungkin dua proton terikat bersama, tapi sama juga membuat fusi pada bintang menjadi mustahil. Rees menunjuk pada fakta bahwa Fred Hoyle menemukan bahwa perubahan sekecil 4 persen pun dalam gaya nuklir akan membuat pembentukan karbon

pada bintang menjadi mustahil, memustahilkan pembentukan unsur lebih tinggi dan kehidupan. Hoyle menemukan bahwa bila seseorang mengubah gaya nuklir sedikit saja, maka beryllium akan begitu tak stabil sehingga takkan pernah bisa menjadi "jembatan" untuk membentuk atom-atom karbon.

Yang kedua adalah N, sama dengan 10^{36}, yaitu kekuatan gaya listrik dibagi dengan kekuatan gravitasi, yang menunjukkan betapa lemahnya gravitasi. Seandainya gravitasi lebih lemah lagi, maka bintang-bintang tidak dapat berkondensasi dan menghasilkan temperatur tinggi yang dibutuhkan untuk fusi. Karenanya, bintang-bintang tidak akan bersinar, dan planet-planet akan diliputi kegelapan membekukan.

Tapi jika gravitasi sedikit lebih kuat, ini akan menyebabkan bintang-bintang memanas terlalu cepat, dan mereka akan membakar bahan bakar mereka dengan begitu cepat sehingga kehidupan takkan pernah bisa dimulai. Di samping itu, gravitasi yang lebih kuat mengandung arti bahwa galaksi-galaksi akan terbentuk lebih awal dan akan kecil sekali. Bintang-bintang akan lebih sesak, menghasilkan tubrukan antara berbagai bintang dan planet.

Yang ketiga adalah Omega, densitas relatif alam semesta. Seandainya Omega terlalu kecil, maka alam semesta akan mengembang dan mendingin terlalu cepat. Tapi seandainya Omega terlalu besar, maka alam semesta akan kolaps sebelum kehidupan bisa dimulai. Rees menulis, "Pada satu detik setelah *big bang*, Omega tidak boleh berselisih dari kesatuan sebanyak lebih dari 1 bagian dalam 1 juta

miliar (1 dalam 10^{15}) supaya alam semesta, setelah 10 miliar tahun, masih mengembang sekarang dan dengan harga Omega yang memang tidak menyimpang liar dari kesatuan."

Yang keempat adalah Lambda, konstanta kosmologis, yang menentukan percepatan alam semesta. Seandainya beberapa kali lebih besar, antigravitasi yang dihasilkannya akan meniup alam semesta saling menjauh, menyebabkannya segera memasuki *big freeze*, membuat kehidupan menjadi mustahil. Tapi seandainya konstanta kosmologisnya negatif, alam semesta akan berkontraksi/menyusut kasar menuju *big crunch*, terlalu cepat untuk terbentuknya kehidupan. Dengan kata lain, konstanta kosmologis, sebagaimana Omega, harus pula berada dalam pita tipis tertentu untuk memungkinkan kehidupan.

Yang kelima adalah Q, amplitudo ketidakteraturan dalam gelombang mikro kosmik latar, yang sama dengan 10^{-5}. Seandainya bilangan ini sedikit lebih kecil, maka alam semesta akan berupa, sekumpulan gas dan debu amat seragam yang tak bernyawa, yang takkan pernah berkondensasi menjadi bintang dan galaksi hari ini. Alam semesta akan gelap, seragam, tak berfitur, dan tak bernyawa. Seandainya Q lebih besar, maka materi akan berkondensasi lebih awal dalam sejarah alam semesta, menjadi struktur-struktur besar supergalaksi. "Gumpalan-gumpalan besar materi akan berkondensasi menjadi *black hole* besar," kata Rees. *Black hole-black hole* ini akan lebih berat daripada keseluruhan gugus galaksi. Bintang-bintang yang terbentuk di gugus gas besar ini akan sangat sesak sehingga sistem-sistem planet akan menjadi mustahil.

Yang terakhir adalah D, jumlah dimensi ruang. Akibat adanya perhatian terhadap teori-M, fisikawan kembali mempertanyakan apakah kehidupan eksis di dimensi lebih tinggi atau lebih rendah. Jika ruangnya satu dimensi, maka kehidupan barangkali tidak dapat eksis sebab alam semestanya kecil. Biasanya, ketika fisikawan mencoba menerapkan teori quantum pada alam semesta satu-dimensi, kita mendapati bahwa partikel-partikel melewati satu sama lain tanpa berinteraksi. Jadi adalah mungkin bahwa alam semesta yang eksis di satu dimensi tidak dapat menopang kehidupan karena partikel-partikel tak bisa "bersatu" guna membentuk objek-objek yang semakin kompleks.

Di ruang dua dimensi, kita juga menghadapi persoalan karena bentuk-bentuk kehidupan barangkali akan berdisintegrasi. Bayangkan ras makhluk flat 2-dimensi, disebut Flatlander, yang hidup di permukaan meja. Bayangkan mereka mencoba untuk makan. Terusan yang membentang dari mulut ke bagian belakangnya akan membelah Flatlander, dan dia akan ambruk berantakan. Dengan demikian, sulit untuk membayangkan bagaimana seorang Flatlander dapat eksis sebagai makhluk kompleks tanpa berdisintegrasi atau ambruk berkeping-keping.

Argumen lain dari biologi mengindikasikan bahwa keberakalan tidak dapat eksis di dimensi yang kurang dari tiga. Otak kita terdiri dari sejumlah besar neutron tumpang-tindih yang dihubungkan oleh jaringan listrik besar. Seandainya alam semesta adalah satu dimensi atau dua dimensi, maka akan sulit untuk membangun jaringan-

jaringan syaraf kompleks, terutama jika mereka mengalami korsleting dengan bertumpang tindih di atas satu sama lain. Di dimensi lebih rendah, kita sangat dibatasi dalam menempatkan jumlah sirkuit dan syaraf otak kompleks di area kecil. Otak kita sendiri, contohnya, terdiri dari sekitar 100 miliar syaraf, kurang lebih sama dengan jumlah bintang di galaksi Bima Sakti, dengan tiap-tiap syaraf terhubung ke sekitar 10.000 syaraf lain. Kompleksitas seperti itu akan sulit ditiru di dimensi lebih rendah.

Di ruang empat dimensi, seseorang mendapat persoalan lain: planet-planet tidak stabil di orbit mereka di sekeliling Matahari. Hukum kuadrat terbalik Newton digantikan oleh hukum kubik terbalik, dan pada 1917, Paul Ehrenfest, kolega dekat Einstein, berspekulasi mengenai seperti apa fisika kemungkinannya di dimensi lain. Dia menganalisis apa yang disebut persamaan Poisson-Laplace (yang mengatur gerakan objek planet serta muatan listrik dalam atom) dan menemukan bahwa orbit-orbit tidak stabil di ruang empat dimensi atau lebih tinggi. Karena elektron-elektron dalam atom serta planet mengalami tubrukan acak, artinya atom dan tata surya barangkali tidak bisa eksis di dimensi lebih tinggi. Dengan kata lain, tiga dimensi adalah istimewa.

Bagi Rees, prinsip antropik merupakan salah satu argumen paling memaksa untuk multiverse. Seperti halnya eksistensi zona Goldilocks untuk Bumi yang mengimplikasikan planet-planet ekstrasurya, eksistensi zona Goldilocks untuk alam semesta mengimplikasikan adanya alam semesta-alam semesta paralel. Rees berkomentar, "Jika

ada stok besar pakaian, tidak heran Anda menemukan setelan yang cocok. Jika ada banyak alam semesta, yang tiap-tiapnya diatur oleh set angka berbeda-beda, akan ada satu [alam semesta] di mana terdapat set angka istimewa yang cocok untuk kehidupan. Kita berada di [alam semesta] yang satu itu." Dengan kata lain, alam semesta kita adalah demikian adanya disebabkan oleh hukum rata-rata atas banyak alam semesta di multiverse, bukan lantaran rancangan besar.

Weinberg rupanya sependapat pada poin ini. Weinberg, malahan, merasa ide multiverse sungguh menyenangkan secara intelektual. Dia tak pernah menyukai ide bahwa waktu dapat mendadak eksis saat *big bang*, dan bahwa waktu tidak mungkin eksis sebelum itu. Di multiverse, kita memiliki pembentukan alam semesta secara terus-menerus.

Ada alasan khusus lain mengapa Rees lebih menyukai ide multiverse. Alam semesta, dia menemukan, mengandung sejumlah kecil "kejelekan". Contohnya, orbit Bumi sedikit elips. Seandainya elips sempurna, maka seseorang dapat berargumen, sebagaimana para teolog, bahwa itu merupakan produk sampingan intervensi tuhan. Tapi nyatanya tidak, mengindikasikan keacakan dalam jumlah tertentu di pita tipis Goldilocks. Demikian pula, konstanta kosmologis tidak nol sempurna, melainkan kecil, yang mengindikasikan bahwa alam semesta kita "tidak lebih istimewa dari yang dibutuhkan oleh keberadaan kita". Ini semua konsisten dengan alam semesta kita yang dihasilkan secara acak melalui kebetulan.

Evolusi Alam Semesta

Sebagai astronom, bukan sebagai filsuf, Rees mengatakan bahwa garis besarnya semua teori ini harus diuji. Kenyataannya, itulah alasannya mengapa dia menyukai ide multiverse daripada teori-teori mistis pesaing. Teori multiverse, dia percaya, bisa diuji dalam 20 tahun ke depan.

Salah satu variasi ide multiverse betul-betul dapat diuji hari ini. Fisikawan Lee Smolin bahkan melangkah lebih jauh daripada Rees dan berasumsi bahwa terjadi "evolusi" alam semesta, serupa dengan evolusi ala Darwin, yang akhirnya menghasilkan alam semesta seperti punya kita. Dalam teori inflasi *chaos* (*chaotic inflationary theory*), misalnya, konstanta fisik "puteri" alam semesta mempunyai konstanta fisik yang sedikit berbeda dari induk alam semesta. Jika alam semesta dapat bertunas dari *black hole*, sebagaimana diyakini beberapa fisikawan, maka alam semesta yang mendominasi multiverse adalah mereka yang mempunyai paling banyak *black hole*. Ini berarti, seperti dalam kerajaan binatang, alam semesta yang melahirkan paling banyak "anak" akhirnya mendominasi dan menyebarkan "informasi genetik" mereka—konstanta fisik alam. Jika benar, maka alam semesta kita mungkin mempunyai leluhur alam semesta dalam jumlah tak terhingga di masa lampau, dan alam semesta kita merupakan produk sampingan seleksi alam selama triliunan tahun. Dengan kata lain, alam semesta kita adalah produk sampingan dari *survival of the fittest* (yang terkuat yang bertahan hidup), artinya ia merupakan anak alam semesta dengan jumlah *black hole* maksimum.

Walaupun evolusi Darwin di antara alam semesta merupakan ide aneh dan baru, Smolin percaya bahwa itu dapat diuji dengan menghitung jumlah *black hole*. Alam semesta kita semestinya paling menguntungkan untuk pembentukan *black hole*. (Bagaimanapun, seseorang masih harus membuktikan bahwa alam semesta ber-*black hole* paling banyak adalah alam semesta yang menyokong kehidupan, seperti punya kita.)

Karena ide ini bisa diuji, contoh tandingan dapat dipertimbangkan. Misalnya, mungkin dapat ditunjukkan, dengan menyetel parameter fisika alam semesta secara hipotetis, bahwa *black hole* paling mudah dihasilkan di alam semesta yang tak bernyawa. Misalnya, mungkin seseorang dapat menunjukkan bahwa sebuah alam semesta bergaya nuklir jauh lebih kuat memiliki bintang-bintang yang habis terbakar secara amat cepat, menghasilkan supernova dalam jumlah besar yang kemudian kolaps menjadi *black hole*. Di alam semesta demikian, harga gaya nuklir yang lebih besar mengandung arti bahwa bintang-bintang hidup secara singkat, dan karenanya kehidupan tidak bisa dimulai. Tapi alam semesta ini mungkin pula mempunyai lebih banyak *black hole*, dengan demikian menyangkal ide Smolin. Keunggulan ide ini adalah ia dapat diuji, direproduksi, atau dipalsukan (tanda teori ilmiah sejati). Waktu akan memberitahu apakah ia bertahan atau tidak.

Walaupun teori yang melibatkan *wormhole*, superstring, dan dimensi tinggi berada di luar jangkauan kemampuan eksperimen mutakhir kita, eksperimen-eksperimen baru tengah dijalankan dan eksperimen masa mendatang sudah direncanakan, yang mungkin

dapat menentukan apakah teori-teori ini benar atau tidak. Kita berada di tengah-tengah revolusi sains eksperimen, dengan satelit, teleskop antariksa, detektor gelombang gravitasi, dan laser berkekuatan penuh sedang dibawakan untuk menyinggung pertanyaan-pertanyaan ini. Panen melimpah dari eksperimen-eksperimen ini bisa memecahkan beberapa pertanyaan terdalam dalam kosmologi dengan sangat baik.

Bab 9
Mencari Gema Dari Dimensi Kesebelas

Klaim luar biasa membutuhkan bukti luar biasa.

—Carl Sagan

Alam semesta paralel, portal dimensi, dan dimensi tinggi, betapapun spektakuler, memerlukan bukti eksistensi yang ketat. Sebagaimana dikemukakan Ken Croswell, "[Teori] alam semesta lain bisa memabukkan: Anda dapat mengatakan apapun tentang mereka semau Anda dan tak pernah terbukti salah, sepanjang astronom tidak pernah melihat mereka." Sebelumnya sia-sia saja menguji banyak prediksi ini, berdasarkan keprimitifan peralatan eksperimen kita. Namun, kemajuan mutakhir dalam komputer, laser, dan teknologi satelit secara menggiurkan telah mendekatkan banyak teori ini menuju verifikasi eksperimen.

Verifikasi langsung atas ide-ide ini mungkin luar biasa sulit, tapi verifikasi tak langsung dapat dijangkau. Terkadang kita lupa bahwa banyak dari sains astronomi yang dikerjakan secara tak langsung. Contoh, tak ada seorang pun yang pernah mengunjungi Matahari atau bintang-bintang, tapi kita mengetahui dari apa bintang terbuat dengan menganalisa cahaya yang dilepaskan oleh objek-objek berkilau ini. Dengan menganalisis spektrum cahaya pada cahaya bintang, kita tahu

secara tak langsung bahwa bintang utamanya terbuat dari hidrogen dan beberapa helium. Demikian halnya, tak ada seorang pun yang pernah melihat *black hole*, dan faktanya *black hole* tidak tampak dan tidak bisa dilihat secara langsung. Namun, kita melihat bukti tak langsung eksistensi mereka dengan mencari cakram akresi dan mengkomputasi massa bintang-bintang mati ini.

Dalam semua eksperimen ini, kita mencari "gema" dari bintang dan *black hole* untuk menetapkan sifat mereka. Demikian pula, dimensi kesebelas mungkin di luar jangkauan langsung kita, tapi ada cara di mana inflasi dan teori superstring dapat diverifikasi, mengingat hadirnya instrumen revolusioner baru yang sekarang tersedia bagi kita.

GPS dan Relativitas

Contoh paling sederhana bagaimana satelit telah merevolusi penelitian relativitas adalah Global Positioning System (GPS), di mana 24 satelit terus-menerus mengorbit Bumi, memancarkan sinyal sinkron yang memungkinkan kita memetakan posisi seseorang di planet ini hingga akurasi luar biasa. GPS telah menjadi fitur esensial navigasi, perniagaan, serta peperangan. Segala hal mulai dari peta terkomputerisasi yang ada di dalam mobil sampai misil penjelajah bergantung kepada kemampuan mensinkronisasikan sinyal-sinyal dalam 50 permiliar detik untuk menemukan sebuah objek di Bumi dalam jarak 15 yard. Tapi untuk menjamin akurasi seluar biasa itu, ilmuwan harus mengkalkulasi koreksi kecil pada hukum Newton

lantaran adanya relativitas, yang menyatakan bahwa frekuensi gelombang radio akan sedikit tergeser saat satelit membumbung di angkasa luar. Kenyataannya, bila kita dengan bodohnya membuang koreksi akibat relativitas tersebut, maka jam GPS akan berjalan lebih cepat setiap hari sebesar 40.000 permiliar detik, dan seluruh sistem tidak akan bisa diandalkan. Dengan demikian, teori relativitas mutlak esensial untuk perniagaan dan militer. Fisikawan Clifford Will, yang pernah memberi penerangan singkat kepada seorang jenderal Angkatan Udara AS mengenai koreksi krusial pada GPS yang berasal dari teori relativitas Einstein, suatu kali berkomentar bahwa dirinya tahu teori relativitas sudah cukup umur ketika pejabat senior Pentagon harus diberi penerangan singkat tentangnya.

Detektor Gelombang Gravitasi

Sejauh ini, hampir segala hal yang kita ketahui mengenai astronomi hadir dalam bentuk radiasi elektromagnet, entah itu cahaya bintang atau radio atau sinyal gelombang mikro dari ruang angkasa. Nah, ilmuwan sedang memperkenalkan medium baru pertama untuk penemuan ilmiah, gravitasi itu sendiri. "Setiap kali kita menatap langit dengan suatu cara baru, kita menyaksikan alam semesta baru," kata Gary Sanders dari Cal Tech dan deputi direktur proyek gelombang gravitasi.

Einstein-lah, pada 1916, yang pertama kali mengajukan eksistensi gelombang gravitasi. Pikirkan apa yang terjadi jika Matahari lenyap. Ingat analogi bola bowling yang terbenam ke dalam kasur? Atau, yang

lebih baik, jaring trampolin? Jika bola tiba-tiba diangkat, jaring trampolin akan segera muncul kembali ke posisi awalnya, menghasilkan gelombang kejut yang meriak ke luar di sepanjang jaring trampolin. Jika bola bowling digantikan dengan Matahari, maka kita melihat bahwa gelombang kejut gravitasi berjalan pada kecepatan spesifik, kecepatan cahaya.

Walaupun berikutnya Einstein menemukan solusi akurat persamaannya yang memperkenankan gelombang gravitasi, dia kehilangan harapan akan bisa menyaksikan prediksinya terverifikasi selagi dia masih hidup. Gelombang gravitasi luar biasa lemah. Bahkan gelombang kejut tubrukan bintang tidak cukup kuat untuk diukur oleh eksperimen mutakhir.

Saat ini, gelombang gravitasi hanya terdeteksi secara tak langsung. Dua fisikawan, Russell Hulse dan Joseph Taylor Jr, menaksir bahwa jika Anda menganalisis bintang neutron biner yang berputar-putar dan saling mengejar, maka masing-masing bintang akan memancarkan arus gelombang gravitasi, serupa dengan gelombang lemah yang dihasilkan oleh pengadukan sirup, sewaktu orbit mereka perlahan-lahan meluruh. Mereka menganalisis spiral sekarat dua bintang neutron sewaktu perlahan-lahan menspiral ke arah satu sama lain. Fokus penyelidikan mereka adalah bintang neutron ganda PSR 1913+16, berlokasi sekitar 16.000 tahun-cahaya dari Bumi, yang mengorbit satu sama lain setiap 7 jam 45 menit, dalam proses yang memancarkan gelombang gravitasi ke angkasa luar.

Memakai teori Einstein, mereka menemukan bahwa kedua bintang

semestinya semakin mendekat sebanyak 1 milimeter setiap revolusi. Walaupun jarak ini luar biasa kecil, ia meningkat hingga 1 yard setelah 1 tahun, selagi orbit 435.000 mil perlahan-lahan berkurang ukurannya. Penelitian rintisan mereka menunjukkan bahwa orbit meluruh persis sebagaimana diprediksikan teori Einstein atas dasar gelombang gravitasi. (Persamaan Einstein, kenyataannya, memprediksi bahwa bintang-bintang akhirnya akan terjerumus ke satu sama lain dalam 240 juta tahun, akibat hilangnya energi yang dipancarkan ke ruang angkasa dalam bentuk gelombang gravitasi.) Atas penelitian tersebut, mereka memenangkan Hadiah Nobel fisika pada 1993.

Kita bisa juga melangkah ke belakang dan memakai eksperimen akurat ini untuk mengukur akurasi relativitas umum sendiri. Saat kalkulasi dilakukan terbalik, kita mendapati bahwa relativitas umum sekurangnya 99,7% akurat.

Detektor Gelombang Gravitasi LIGO

Tapi untuk menggali informasi berguna mengenai alam semesta awal, seseorang harus mengobservasi gelombang gravitasi secara langsung, bukan tak langsung. Pada 2003, detektor operasional gelombang gravitasi pertama, LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), akhirnya meluncur, merealisasikan impian berdekade-dekade untuk menyelidiki misteri alam semesta dengan gelombang gravitasi. Sasaran LIGO adalah mendeteksi peristiwa kosmik yang terlampau jauh atau kecil untuk diobservasi oleh teleskop Bumi, seperti tubrukan *black hole* atau bintang neutron.

LIGO terdiri dari dua fasilitas laser raksasa, satu di Hanford, Washington, dan satunya lagi di Livingston Parish, Louisiana. Tiap fasilitas mempunyai dua pipa, masing-masing sepanjang 2,5 mil, menghasilkan pipa raksasa berbentuk L. Dalam setiap pipa ditembakkan laser. Pada lipatan L, kedua sinar laser bertubrukan, dan gelombang mereka berinterferensi dengan satu sama lain. Normalnya, bila tidak terdapat disturbansi, kedua gelombang akan sinkron sehingga mereka saling menetralisir. Tapi jika gelombang gravitasi kecil sekalipun terpancar dari tubrukan *black hole* dan bintang nuetron mengenai piranti, itu menyebabkan satu lengan berkontraksi dan mengembang secara berbeda dari lengan lain. Disturbansi ini cukup untuk mengacaukan penetralan halus dua sinar laser. Alhasil, kedua sinar laser, bukannya saling menetralkan, menciptakan pola interferensi khas mirip gelombang yang bisa dianalisis oleh komputer secara detil. Semakin besar gelombang gravitasinya, semakin besar ketidaksepadanan antara dua sinar laser, dan semakin besar pola interferensinya.

Teknik LIGO sungguh mengagumkan. Karena molekul udara dapat menyerap sinar laser, pipa yang menampung sinar harus dikosongkan sampai sepertriliun tekanan atmosfer. Tiap-tiap detektor memakan 300.000 kaki kubik ruang, artinya LIGO mempunyai ruang vakum artifisial terbesar di dunia. Yang memberi LIGO sensitifitas sehebat itu, sebagian, adalah desain cermin, yang dikendalikan oleh magnet kecil, enam buah secara keseluruhan, masing-masing seukuran semut. Cermin-cerminnya begitu mengkilap sehingga akurat sampai 1 bagian

dalam 30 permiliar inchi. "Bayangkan seandainya Bumi sehalus itu. Rata-rata gunung tidak akan menjulang lebih dari satu inchi," kata GariLynn Billingsley, yang mengawasi cermin. Mereka begitu halus sehingga dapat dipindahkan sejauh kurang dari seperjuta meter, yang barangkali menjadikan cermin LIGO sebagai cermin paling sensitif di dunia. "Kebanyakan insinyur sistem kendali berhenti bicara ketika mendengar apa yang coba kami lakukan," kata ilmuwan LIGO, Michael Zucker.

Karena LIGO luar biasa seimbang, kadang-kadang ia terganggu oleh getaran kecil tak diinginkan dari sumber-sumber yang sulit dipercaya. Detektor di Louisiana, misalnya, tidak dapat dijalankan di siang hari lantaran adanya penebang pohon yang menebang pepohonan pada jarak 1.500 kaki dari lokasi. (LIGO begitu sensitif sampai-sampai penebangan yang berlangsung pada jarak satu mil membuatnya tidak bisa dijalankan di siang hari.) Di malam hari pun, getaran dari kereta barang yang lewat di tengah malam dan pukul 6 pagi mengurung banyaknya waktu berkesinambungan operasi LIGO.

Bahkan selemah-lemahnya gelombang samudera yang menghantam garis pantai yang jauhnya bermil-mil, dapat mempengaruhi hasil. Gelombang samudera yang pecah di pantai-pantai Amerika Utara hanyut ke darat setiap 6 detik, secara rata-rata, dan ini menghasilkan geraman rendah yang betul-betul bisa dikenali oleh laser. Kenyataannya, frekuensi *noise* tersebut begitu rendah sehingga betul-betul mempenetrasi bumi. "Terasa seperti gemuruh," kata Zucker, mengomentari *noise* gelombang pasang ini. "Musim angin

ribut di Louisiana sangat memusingkan kepala." LIGO juga terpengaruh oleh arus pasang yang diakibatkan oleh gravitasi Bulan dan Matahari yang menarik Bumi, menghasilkan disturbansi beberapa permiliar inchi.

Guna menyingkirkan disturbansi luar biasa kecil ini, para insinyur LIGO berbuat apa saja untuk mengisolasi banyak bagian piranti ini. Setiap sistem laser bersandar di atas empat peron baja tak berkarat raksasa, masing-masing ditumpuk di atas satu sama lain; masing-masing level dipisahkan oleh pér/pegas untuk meredam getaran. Masing-masing instrumen optik sensitif memiliki sistem isolasi seismik sendiri; lantainya adalah pelat beton setebal 30 inchi yang tidak terangkai dengan dinding.

LIGO sebetulnya merupakan bagian dari sebuah konsorsium internasional, yang mencakup detektor Prancis-Italia bernama VIRGO di Pisa (Italia), detektor Jepang bernama TAMA di luar Tokyo, dan detektor Inggris-Jerman bernama GEO600 di Hanover (Jerman). Secara keseluruhan, biaya konstruksi final LIGO akan mencapai $292 juta (plus $80 juta untuk pemesanan dan *upgrade*), menjadikannya proyek termahal yang pernah didanai oleh National Science Foundation.

Tapi dengan sensitifitas ini pun, banyak ilmuwan mengakui bahwa LIGO mungkin tidak cukup sensitif untuk mendeteksi peristiwa-peristiwa yang sungguh menarik selama masa hidupnya. *Upgrade* berikutnya, LIGO II, dijadwalkan berlangsung pada 2007 bila pendanaan dikabulkan. Jika LIGO tidak mendeteksi gelombang gravitasi, taruhannya LIGO II akan bisa. Ilmuwan LIGO, Kenneth

Libbrecht, mengklaim bahwa LIGO II akan memperbaiki sensitifitas peralatan seribu kali lipat: "Anda beranjak dari [pendeteksian] satu peristiwa setiap 10 tahun, yang agak menyakitkan, ke [pendeteksian] satu peristiwa setiap 3 hari, yang sangat menyenangkan."

Supaya LIGO mendeteksi tubrukan dua *black hole* (dalam jarak 300 juta tahun-cahaya), seorang ilmuwan dapat menunggu selama setahun sampai seribu tahun. Banyak astronom mungkin berpikiran lain mengenai penyelidikan peristiwa demikian dengan LIGO bila penyelidikan ini mengandung arti bahwa cicit mereka akan menjadi orang yang menyaksikan peristiwa tersebut. Tapi sebagaimana dikatakan ilmuwan LIGO, Peter Saulson: "Orang-orang memperoleh kesenangan dari memecahkan tantangan teknis ini, sebagaimana para pembangun katedral di zaman pertengahan yang terus bekerja seraya menyadari bahwa diri mereka mungkin tidak akan melihat gereja yang rampung. Tapi bila tidak ada kesempatan untuk melihat gelombang gravitasi selama karir saya, saya tidak akan bekerja di bidang ini. Ini bukan sekadar demam Nobel... Tingkat presisi yang kami usahakan menandai aktivitas kami; jika Anda berhasil, Anda mendapat 'barang yang tepat'." Dengan LIGO II, kesempatannya jauh lebih baik untuk menemukan peristiwa menarik dalam seumur hidup kita. LIGO II dapat mendeteksi tubrukan *black hole* dalam jarak jauh lebih besar, 6 miliar tahun-cahaya, dengan angka 10 tubrukan per hari sampai 10 tubrukan per tahun.

Namun, LIGO II pun tidak akan cukup canggih untuk mendeteksi gelombang gravitasi yang dipancarkan dari jenak penciptaan. Untuk

itu, kita harus menanti 15 sampai 20 tahun lagi untuk kehadiran LISA.

Detektor Gelombang Gravitasi LISA

LISA (Laser Interferometry Space Antenna) melambangkan detektor gelombang gravitasi generasi berikutnya. Tak seperti LIGO, ia akan berbasis di luar angkasa. Sekitar tahun 2010, NASA dan European Space Agency berencana meluncurkan tiga satelit ke ruang angkasa; mereka akan mengorbit Matahari pada jarak kurang-lebih 30 juta mil dari Bumi. Ketiga detektor laser itu akan membentuk segitiga sama sisi di ruang angkasa (setiap sisi sepanjang 5 juta kilometer). Masing-masing satelit akan mempunyai dua laser yang memungkinkannya terus-menerus berhubungan dengan dua satelit lain. Walaupun setiap laser akan menembakkan sinar dengan daya setengah watt saja, optiknya begitu sensitif sehingga mereka akan mampu mendeteksi getaran-getaran yang datang dari gelombang gravitasi dengan akurasi 1 bagian dalam 1 miliar triliun (setara dengan perubahan lebar atom tunggal sebesar seperseratus). LISA semestinya mampu mendeteksi gelombang gravitasi dari jarak 9 miliar tahun-cahaya, yang melintasi sebagian besar alam semesta tampak.

LISA akan begitu akurat sampai-sampai bisa mendeteksi gelombang kejut awal dari *big bang* sendiri. Ini akan memberi kita pandangan paling akurat terhadap jenak penciptaan. Jika semuanya berjalan sesuai rencana, LISA semestinya mampu mengintai hingga sepertriliun detik pertama pasca *big bang*, menjadikannya sebagai alat kosmologi yang barangkali paling hebat dibanding yang lain. Diyakini bahwa

LISA mungkin mampu menemukan data eksperimen pertama mengenai sifat persis *unified field theory, theory of everything.*

Sasaran penting LISA adalah menyediakan "bukti" untuk teori inflasi. Sejauh ini, inflasi konsisten dengan semua data kosmologis (keflatan, fluktuasi kosmik latar, dan sebagainya). Tapi tidak berarti bahwa teori tersebut benar. Untuk membereskan teori tersebut, ilmuwan ingin memeriksa gelombang gravitasi yang dilepaskan oleh proses inflasi itu sendiri. "Sidik jari" gelombang gravitasi yang terbentuk pada jenak *big bang* semestinya memberitahukan perbedaan antara inflasi dan teori pesaing. Beberapa ilmuwan, seperti Kip Thorne dari Cal Tech, percaya bahwa LISA mungkin mampu memberitahukan apakah suatu versi teori string benar. Sebagaimana saya jelaskan di bab 7, teori *inflationary universe* memprediksikan bahwa gelombang gravitasi yang timbul dari *big bang* semestinya sungguh keras, setara dengan perluasan eksponensial pesat alam semesta awal, sedangkan model *ekpyrotic* memprediksikan perluasan yang jauh lebih halus, diiringi dengan gelombang gravitasi yang jauh lebih halus. LISA semestinya mampu menyingkirkan beragam teori *big bang* pesaing dan menjadi penguji krusial untuk teori string.

Lensa dan Cincin Einstein

Tapi alat mumpuni lain dalam mengeksplorasi kosmos adalah lensa gravitasi dan "cincin Einstein". Pada awal tahun 1801, astronom Berlin, Johan Georg von Soldner, sanggup mengkalkulasi defleksi/pembelokan cahaya bintang oleh gravitasi Matahari (walaupun, lantaran Soldner

menggunakan argumen-argumen Newtonian secara keras, dia salah sebesar faktor 2 yang krusial. Einstein menulis, "Separuh dari defleksi ini dihasilkan oleh medan tarikan matahari Newtonian, separuh lainnya oleh modifikasi ['pelengkungan'] geometris ruang yang disebabkan oleh matahari.")

Pada 1912, bahkan sebelum merampungkan versi final relativitas umum, Einstein merenungkan kemungkinan penggunaan defleksi ini sebagai "lensa", sebagaimana kacamata Anda menekuk cahaya sebelum mencapai mata Anda. Pada 1936, insinyur Ceko, Rudi Mandl, menulis kepada Einstein untuk menanyakan apakah lensa gravitasi bisa memperbesar cahaya dari bintang dekat. Jawabannya adalah ya, tapi untuk mendeteksinya berada di luar jangkauan teknologi mereka.

Einstein khususnya menyadari bahwa Anda akan melihat ilusi optis, seperti citra ganda dari objek yang sama, atau distorsi cahaya mirip cincin. Cahaya dari galaksi amat jauh yang melewati Matahari kita, misalnya, akan menempuh ke kiri dan ke kanan Matahari kita sebelum cahaya tersebut bergabung kembali dan mencapai mata kita. Ketika kita menatap galaksi jauh tersebut, kita melihat pola mirip cincin, sebuah ilusi optis yang ditimbulkan oleh relativitas umum. Einstein menyimpulkan bahwa "tak ada banyak harapan untuk mengobservasi fenomena ini secara langsung". Kenyataannya, dia menulis bahwa penelitian ini "berharga sedikit, tapi membuat orang miskin itu [Rudi Mandl] bahagia".

Lebih dari 40 tahun kemudian, pada 1979, bukti parsial pertama atas pelensaan ditemukan oleh Dennis Walsh dari Jordell Bank

Observatory di Inggris, yang menemukan quasar ganda Q0957+561. Pada 1988, cincin Einstein pertama teramati dari sumber radio MG1131+0456. Pada 1997, teleskop antariksa Hubble dan kesatuan teleskop radio MERLIN (Inggris) menangkap cincin Einstein sirkuler utuh dengan menganalisis galaksi jauh 1938+666, mempertahankan teori Einstein sekali lagi. (Cincin itu kecil sekali, hanya satu detik busur, atau kira-kira seukuran uang koin yang dilihat dari jarak 2 mil.) Astronom melukiskan kehebohan yang mereka rasakan saat menyaksikan peristiwa bersejarah ini: "Pada pandangan pertama, itu terlihat artifisial dan kami pikir itu semacam cacat pada citra, tapi kemudian kami menyadari bahwa kami sedang menatap cincin Einstein sempurna!" kata Ian Brown dari Universitas Manchester. Hari ini, cincin Einstein merupakan senjata penting dalam gudang senjata astrofisikawan. Sekitar 64 quasar dobel, tripel, dan multipel (ilusi yang ditimbulkan oleh pelensaan Einstein) telah terlihat di angkasa luar, atau kira-kira 1 dalam setiap 500 quasar yang teramati.

Bahkan bentuk-bentuk materi yang tak terlihat, seperti *dark matter*, dapat "dilihat" dengan menganalisis distorsi gelombang cahaya yang mereka hasilkan. Dengan cara ini, seseorang bisa memperoleh "peta" yang menunjukkan distribusi *dark matter* di alam semesta. Karena pelensaan Einstein mendistorsi gugus-gugus galaksi dengan menciptakan busur (daripada cincin) besar, adalah mungkin untuk mengestimasi konsentrasi *dark matter* di gugus-gugus ini. Pada 1986, busur galaktik raksasa pertama ditemukan oleh astronom di National Optical Astronomy Observatory, Universitas Stanford, dan Midi-

Pyrenees Observatory di Prancis. Sejak saat itu, sekitar seratus busur galaktik telah ditemukan, yang paling dramatis di gugus galaksi Abell 2218.

Lensa Einstein juga bisa dipakai sebagai metode independen untuk mengukur jumlah MACHO di alam semesta (yang terdiri dari materi biasa seperti bintang mati, bintang kerdil cokelat, dan awan debu). Pada 1986, Bohdan Paczynski dari Princeton menyadari bahwa bila MACHO melintas di depan sebuah bintang, kecerlangan MACHO akan membesar dan menghasilkan citra kedua.

Pada awal 1990-an, beberapa tim ilmuwan (seperti **EROS** Prancis, **MACHO** Amerika-Australia, **OGLE** Polandia-Amerika) menerapkan metode ini pada pusat galaksi Bima Sakti dan menemukan lebih dari 500 peristiwa pelensaan (melampaui pekiraan, sebab beberapa dari materi ini terdiri dari bintang bermassa rendah dan bukan MACHO sejati). Metoda ini juga bisa dipakai untuk menemukan planet ekstrasurya yang mengorbit bintang lain. Karena sebuah planet mengerahkan efek gravitasi kecil namun nyata terhadap cahaya bintang induk, pelensaan Einstein pada prinsipnya bisa mendeteksi mereka. Metode ini telah mengidentifikasi sejumlah kecil kandidat planet ekstrasurya, beberapa dari mereka berada di dekat pusat Bima Sakti.

Bahkan konstanta Hubble dan konstanta kosmologis bisa diukur menggunakan lensa Einstein. Konstanta Hubble diukur dengan melakukan observasi halus. Quasar mencerlang dan meredup seiring waktu; seseorang dapat menduga bahwa quasar ganda, sebagai citra

dari objek yang sama, akan berosilasi pada laju yang sama. Sebetulnya, quasar kembar ini tidak sungguh berosilasi berbarengan. Menggunakan pengetahuan atas distribusi materi, astronom bisa mengkalkulasi *time delay* (kelambatan waktu) dibagi dengan waktu total yang diperlukan cahaya untuk mencapai Bumi. Dengan mengukur *time delay* dalam pencerlangan quasar ganda, seseorang bisa mengkalkulasi jaraknya dari Bumi. Mengetahui ingsutan merah-nya, dia bisa mengkalkulasi konstanta Hubble. (Metode ini diterapkan pada quasar Q0957+561, yang ditemukan kurang-lebih 14 miliar tahun-cahaya dari Bumi. Sejak saat itu, konstanta Hubble telah dikomputasi dengan menganalisis tujuh quasar lain. Dalam ambang galat, kalkulasi ini cocok dengan temuan yang didapat. Yang menarik adalah bahwa metode ini sama sekali terbebas dari kecerlangan bintang, seperti Cepheid dan supernova tipe Ia, sehingga memberikan pengawasan independen terhadap hasil yang diperoleh.)

Konstanta kosmologis, yang mungkin memegang kunci menuju masa depan alam semesta kita, juga bisa diukur dengan metode ini. Kalkulasinya sedikit mentah, tapi juga cocok dengan metode lain. Karena miliaran tahun lalu volume total alam semesta adalah lebih kecil, probabilitas penemuan quasar yang akan membentuk lensa Einstein juga lebih besar di masa lalu. Jadi, dengan mengukur jumlah quasar dobel pada waktu berlainan dalam evolusi alam semesta, seseorang bisa mengkalkulasi secara kasar volume total alam semesta dan konstanta kosmologis, yang membantu mendorong perluasan alam semesta. Pada 1998, astronom di Harvard-Smithsonian Center for

Astrophysics membuat estimasi mentah pertama atas konstanta kosmologis dan menyimpulkan bahwa itu mungkin menyusun tak lebih dari 62% kandungan total materi/energi alam semesta. (Temuan aktual WMAP adalah 73%.)

Dark Matter di Ruang Tinggal Anda

Dark matter, jika ia memang meliputi/merembes alam semesta, tidak semata-mata eksis di kevakuman angkasa yang dingin. Kenyataannya, semestinya ia ditemukan pula di ruang tinggal Anda. Hari ini, sejumlah tim penelitian sedang berlomba untuk melihat siapa yang akan menjadi pihak pertama yang menjerat partikel *dark matter* pertama di laboratorium. Taruhannya tinggi; tim yang mampu menangkap partikel *dark matter* yang melewati detektor mereka akan menjadi orang pertama yang mendeteksi bentuk materi baru dalam 2.000 tahun ini.

Ide sentral di balik eksperimen-eksperimen ini adalah dengan menggunakan seblok besar material murni (seperti sodium iodide, aluminium oxide, freon, germanium, atau silikon), yang di dalamnya partikel-partikel *dark matter* kemungkinan berinteraksi. Adakalanya, partikel *dark matter* bertubrukan dengan nukleus atom dan menimbulkan pola peluruhan khas. Dengan memotret jejak-jejak partikel yang terlibat dalam peluruhan ini, ilmuwan dapat mengkonfirmasi kehadiran *dark matter*.

Para pelaksana eksperimen lumayan optimis, sebab sensitifitas peralatan mereka memberi mereka kesempatan bagus untuk

mengamati *dark matter*. Tata surya kita mengorbit *black hole* di pusat galaksi Bima Sakti pada kecepatan 220 kilometer per detik. Alhasil, planet kita menembus amat banyak *dark matter*. Fisikawan mengestimasi bahwa 1 miliar partikel *dark matter* mengalir melewati setiap meter persegi dunia kita setiap detik, termasuk melewati tubuh kita.

Walaupun kita hidup dalam "angin *dark matter*" yang bertiup di tata surya kita, eksperimen untuk mendeteksi *dark matter* di laboratorium luar biasa sulit dilakukan karena partikel *dark matter* berinteraksi dengan materi biasa secara begitu lemah. Contoh, ilmuwan berharap mendapati 0,01 sampai 10 peristiwa per tahun terjadi dalam satu kilogram material di laboratorium. Dengan kata lain, Anda harus secara seksama mengawasi kuantitas besar material ini selama bertahun-tahun untuk melihat peristiwa yang konsisten dengan tubrukan *dark matter*.

Sejauh ini, eksperimen-eksperimen dengan singkatan seperti UKDMC di Inggris; ROSEBUD di Canfranc, Spanyol; SIMPLE di Rustrel, Prancis; dan Edelweiss di Frejus, Prancis, masih belum mendeteksi peristiwa demikian. Sebuah eksperimen bernama DAMA, di luar Roma, menimbulkan kegemparan pada tahun 1999 ketika ilmuwan dikabarkan melihat partikel *dark matter*. Karena DAMA menggunakan 100 kilogram sodium iodide, ia merupakan detektor terbesar di dunia. Namun, saat ilmuwan lain mencoba meniru hasil DAMA, mereka tidak menemukan apa-apa, menimbulkan keraguan terhadap temuan DAMA.

Fisikawan David B. Cline meninjau, "Bila detektor-detektor tersebut betul-betul mencatat dan memverifikasi sinyal, itu akan dimasukkan sebagai salah satu prestasi hebat abad 21... Misteri terbesar dalam astrofisika modern mungkin segera terpecahkan."

Jika *dark matter* segera ditemukan, sebagaimana harapan banyak fisikawan, itu dapat menyokong supersimetri (dan barangkali, seiring waktu, teori superstring) tanpa pemakaian pemecah atom.

Dark Matter (Supersimetris) SUSI

Pertimbangan sekilas terhadap partikel-partikel yang diprediksikan oleh supersimetri menunjukkan bahwa terdapat beberapa kandidat potensial yang bisa menjelaskan *dark matter*. Salah satunya adalah neutralino, keluarga partikel yang mengandung superpartner foton. Secara teoritis, neutralino terlihat cocok dengan data. Tidak hanya bermuatan netral, dan tak terlihat, dan juga masif (sehingga hanya terpengaruh oleh gravitasi), ia pun stabil. (Ini lantaran ia memiliki massa partikel terendah dalam keluarganya dan karenanya tidak dapat meluruh ke status lebih rendah). Terakhir, dan mungkin paling penting, alam semesta semestinya penuh dengan neutralino, yang akan menjadikan mereka sebagai kandidat ideal untuk *dark matter*.

Neutralino mempunyai satu keunggulan besar: mereka dapat memecahkan misteri mengapa *dark matter* menyusun 23% kandungan materi/energi alam semesta sedangkan hidrogen dan helium hanya menyusun 4%, angka yang remeh.

Ingat kembali bahwa saat alam semesta berumur 380.000 tahun,

temperatur jatuh sampai atom-atom tak lagi dirobek-robek oleh tubrukan yang disebabkan oleh panas hebat *big bang*. Pada waktu itu, bola api yang mengembang mulai mendingin, berkondensasi, dan membentuk seluruh atom stabil. Keberlimpahan atom hari ini berawal dari kira-kira periode waktu tersebut. Pelajarannya adalah bahwa keberlimpahan materi di alam semesta berawal dari masa ketika alam semesta telah cukup mendingin sehingga materi bisa stabil.

Argumen ini juga bisa digunakan untuk mengkalkulasi keberlimpahan neutralino. Tak lama setelah *big bang*, temperatur begitu panas sehingga neutralino pun hancur oleh tubrukan. Tapi begitu alam semesta mendingin, pada waktu tertentu temperatur cukup jatuh sehingga neutralino bisa terbentuk tanpa dihancurkan. Keberlimpahan neutralino berawal dari era permulaan ini. Saat kita melakukan kalkulasi ini, kita mendapati bahwa keberlimpahan neutralino jauh lebih besar daripada atom, dan kenyataannya kurang-lebih ekuivalen dengan keberlimpahan aktual *dark matter* hari ini. Oleh sebab itu, partikel-partikel supersimetris dapat menjelaskan alasan mengapa *dark matter* sangat berlimpah di sepanjang alam semesta.

Sloan Sky Survey

Walaupun akan ada banyak kemajuan di abad 21 dalam instrumen satelit, tidak berarti bahwa penelitian dalam teleskop radio dan optik berbasis bumi telah disisihkan. Kenyataannya, dampak revolusi digital telah mengubah cara pemanfaatan teleskop radio dan optik,

memungkinkan analisisa statistik atas ratusan ribu galaksi. Teknologi teleskop kini sedang menjalani kesempatan hidup kedua dan mendadak sebagai hasil dari teknologi baru ini.

Secara historis, astronom telah memperebutkan waktu terbatas yang diizinkan kepada mereka untuk memakai teleskop-teleskop terbesar dunia. Mereka secara hati-hati menjaga waktu berharga mereka bersama instrumen-instrumen ini dan menghabiskan berjam-jam bekerja membanting tulang di ruangan dingin dan lembab sepanjang malam. Metode observasi sekuno itu sangat tidak efisien dan sering memercikkan perseteruan di kalangan astronom yang merasa diremehkan oleh "kependetaan" yang memonopoli waktu pemakaian teleskop. Semua ini berubah dengan kedatangan Internet dan komputasi berkecepatan tinggi.

Hari ini, banyak teleskop diotomatisasi sepenuhnya dan dapat diprogram dari jarak ribuan mil oleh astronom yang berlokasi di benua berbeda. Hasil pensurveyan bintang masif ini dapat didigitalisasi dan kemudian ditaruh di Internet, di mana superkomputer-superkomputer canggih dapat menganalisis data tersebut. Salah satu contoh kehebatan metode digital ini adalah SETI@home, sebuah proyek yang berbasis di Universitas California, Berkeley, untuk menganalisis sinyal tanda-tanda makhluk berakal ekstraterestrial. Data masif dari teleskop radio Aricebo di Puerto Rico dipotong-potong menjadi kepingan digital kecil dan kemudian dikirim lewat Internet ke PC di seluruh dunia, utamanya kepada para amatir. Perangkat lunak *screen saver* menganalisis data sinyal makhluk

berakal saat PC sedang tidak dipakai. Menggunakan metode ini, kelompok penelitian tersebut telah membangun jaringan komputer terbesar di dunia, menghubungkan sekitar 5 juta PC dari semua titik di bumi.

Contoh paling menonjol dari eksplorasi digital alam semesta adalah Sloan Sky Survey, yang merupakan pensurveyan langit malam paling ambisius yang pernah dijalankan. Seperti Palomar Sky Survey dahulu, yang memakai pelat fotografis usang yang disimpan dalam volume besar, Sloan Sky Survey akan menghasilkan peta akurat objek-objek angkasa di langit. Pensurveyan tersebut telah membangun peta tiga-dimensi galaksi-galaksi jauh dalam lima warna, termasuk ingsutan merah 1 juta lebih galaksi. Hasil Sloan Sky Survey adalah peta struktur alam semesta skala besar yang beberapa ratus kali lebih besar dari upaya terdahulu. Ia akan memetakan secara detil seperempat langit dan menetapkan posisi dan kecerlangan 100 juta objek angkasa. Ia juga akan menetapkan jarak ke lebih dari 1 juta galaksi dan sekitar 100.000 quasar. Informasi total yang dihasilkan oleh pensurveyan tersebut akan seukuran 15 terabyte (1 triliun byte), menyaingi informasi yang tersimpan di Perpustakaan Kongres.

Jantung Sloan Survey adalah sebuah teleskop 2,5 meter berbasis di selatan New Mexico yang memuat salah satu kamera paling canggih yang pernah diproduksi. Teleskop itu memuat 30 sensor cahaya elektronik halus, disebut CCD (*charge-coupled devices*), masing-masing 2 inchi persegi, disegel dalam ruang vakum. Tiap sensor, yang didinginkan hingga -80^0 C oleh nitrogen cair, memuat 4 juta elemen

gambar. Oleh sebab itu semua cahaya yang dikumpulkan oleh teleskop dapat secara instan didigitalisasi oleh CCD dan kemudian diumpan langsung ke komputer untuk diproses. Berbiaya kurang dari $20 juta, pensurveyan tersebut menghasilkan gambaran alam semesta yang mempesona dengan biaya seperseratus teleskop antariksa Hubble.

Pensurveyan ini kemudian menaruh beberapa data digital ini di Internet, di mana astronom di seluruh dunia bisa mempelajarinya dengan seksama. Dengan cara ini, kita juga dapat memanfaatkan potensi kecerdasan ilmuwan-ilmuwan dunia. Di masa lalu, seringkali ilmuwan di Dunia Ketiga tak mampu mengakses data mutakhir teleskop dan jurnal terbaru. Ini merupakan penyia-nyiaan besar atas talenta ilmu. Kini, berkat Internet, mereka dapat mengunduh data dari pensurveyan langit, membaca artikel-artikel begitu tampil di Internet, dan juga mempublikasikan artikel di Web dengan kecepatan cahaya.

Sloan Survey mengubah cara pengelolaan astronomi, dengan hasil-hasil baru berbasis analisis ratusan ribu galaksi, yang tidak bisa diperoleh beberapa tahun silam. Contoh, pada Mei 2003, sebuah tim ilmuwan dari Spanyol, Jerman, dan AS mengumumkan bahwa mereka telah menganalisis 250.000 galaksi untuk membuktikan *dark matter*. Dari angka besar ini, mereka fokus pada 3.000 galaksi dengan gugus bintang yang mengorbitnya. Dengan menggunakan hukum gerak Newton untuk menganalisis gerakan satelit-satelit ini, mereka mengkalkulasi jumlah *dark matter* yang harus melingkungi galaksi pusat. Para ilmuwan ini telah menyingkirkan teori pesaing. (Sebuah teori alternatif, pertama kali diajukan pada 1983, mencoba

menjelaskan orbit aneh bintang-bintang di galaksi dengan memodifikasi hukum Newton. Barangkali *dark matter* sebetulnya tidak eksis sama sekali melainkan ditimbulkan oleh kesalahan dalam hukum Newton. Data pensurveyan memancarkan keraguan terhadap teori ini.)

Pada Juli 2003, sebuah tim ilmuwan lain dari Jerman dan AS mengumumkan bahwa mereka telah menganalisis 120.000 galaksi dekat dengan menggunakan Sloan Survey untuk mengurai hubungan antara galaksi dan *black hole* di dalamnya. Pertanyaannya adalah: yang mana yang pertama kali muncul, *black hole* atau galaksi yang mengandungnya? Hasil penyelidikan ini mengindikasikan bahwa pembentukan galaksi dan *black hole* terhubung erat, dan bahwa barangkali mereka terbentuk bersama-sama. Ditunjukkan bahwa, dari 120.000 galaksi yang dianalisis dalam pensurveyan ini, 20.000-nya mengandung *black hole* yang masih sedang tumbuh (tak seperti *black hole* di galaksi Bima Sakti, yang terlihat diam). Temuan ini memperlihatkan bahwa galaksi-galaksi yang ukuran *black hole*-nya masih tumbuh adalah jauh lebih besar daripada galaksi Bima Sakti, dan bahwa *black hole* tersebut tumbuh dengan menelan gas relatif dingin dari galaksi.

Mengkompensasi Fluktuasi Termal

Cara lain revitalisasi teleskop optik adalah lewat laser, untuk mengkompensasi distorsi atmosfer. Bintang-bintang tidak berkelap-kelip melainkan bergetar; bintang berkelap-kelip utamanya diakibat-

kan oleh fluktuasi termal kecil di atmosfer. Artinya di luar angkasa, jauh dari atmosfer, bintang-bintang menyilaukan para astronot kita secara terus-menerus. Walaupun kekelap-kelipan ini memberi banyak keindahan pada langit malam, bagi astronom itu merupakan mimpi buruk, mengakibatkan gambar-gambar benda langit yang blur. (Saat kecil, saya ingat pernah menatap gambar-gambar planet Mars yang kabur, berharap ada suatu cara untuk memperoleh gambar jernih planet merah tersebut. Sekiranya disturbansi dari atmosfer dapat disingkirkan dengan pengaturan ulang sorot cahaya, saya pikir, mungkin rahasia kehidupan ekstraterestrial bisa dipecahkan.)

Satu cara untuk mengkompensasi kebluran ini adalah memakai laser dan komputer berkecepatan tinggi guna mengurangi distorsi. Metode ini memakai "optik adaptif", dipelopori oleh teman sekelas saya di Harvard, Claire Max dari Lawrence Livermore National Laboratory, dan yang lainnya, mempergunakan teleskop besar W. M. Keck di Hawaii (terbesar di dunia) dan juga teleskop 3 meter Shane di Lick Observatory di California. Contohnya, dengan menembakkan sinar laser ke luar angkasa, seseorang bisa mengukur fluktuasi temperatur kecil di atmosfer. Informasi ini dianalisis oleh komputer, yang kemudian membuat penyetelan kecil pada cermin teleskop supaya mengkompensasi distorsi cahaya bintang. Dengan cara ini, seseorang bisa mengurangi secara kira-kira disturbansi dari atmosfer.

Metode ini berhasil diujicoba pada 1996 dan sejak saat itu telah menghasilkan gambar-gambar jernih planet, bintang, dan galaksi. Sistem menembakkan cahaya dari *dye laser* berdaya 18 watt, yang bisa

disetel, ke langit. Laser disematkan pada teleskop 3 meter itu, yang cermin-cerminnya (yang bisa diubah bentuk) disetel untuk mengkompensasi distorsi atmosfer. Citranya ditangkap oleh kamera CCD dan lalu didigitalisasi. Dengan anggaran rendah, sistem ini mendapat gambar-gambar yang hampir sebanding dengan teleskop antariksa Hubble. Seseorang bisa melihat detil halus di planet luar dan bahkan mengintip jantung quasar menggunakan metode ini, menghembuskan hidup baru kepada teleskop optik.

Metode ini juga telah meningkatkan resolusi teleskop Keck sebesar faktor 10. Keck Observatory, berlokasi di puncak gunung berapi tidur Mauna Kea, Hawaii, hampir 14.000 kaki di atas permukaan laut, terdiri dari teleskop kembar yang masing-masing berbobot 270 ton. Setiap cermin, berdiameter 10 meter (394 inchi), terdiri dari 30 kepingan heksagonal, yang masing-masingnya bisa secara terpisah dimanipulasi lewat komputer. Pada 1999, sebuah sistem optik adaptif dipasang pada Keck II, terdiri dari sebuah cermin kecil yang bisa berubah bentuk 670 kali per detik. Sistem ini telah menangkap citra bintang-bintang yang mengorbit *black hole* di pusat galaksi Bima Sakti kita, permukaan Neptunus dan Titan (bulan Saturnus), dan bahkan sebuah planet ekstrasurya yang jauhnya melebihi bintang induk berjarak 153 tahun-cahaya dari Bumi. Cahaya dari bintang HD 209458 meredup persis sebagaimana diprediksikan, sewaktu planet tersebut bergerak ke depan bintang ini.

Mengikat Teleskop Radio Bersama-sama

Teleskop radio juga telah direvitalisasi melalui revolusi komputer. Di masa lalu, teleskop radio dibatasi oleh ukuran cakram mereka. Semakin besar cakramnya, semakin banyak sinyal radio yang dapat dihimpun dari ruang angkasa dan dianalisis. Namun, semakin besar cakramnya, semakin mahal biayanya. Satu cara untuk mengatasi permasalahan ini adalah mengikat beberapa cakram bersama-sama untuk meniru kapabilitas superteleskop radio dalam penghimpunan radio. (Teleskop radio terbesar yang dapat diikat bersama di Bumi adalah seukuran Bumi itu sendiri.) Upaya terdahulu untuk mengikat bersama teleskop-teleskop radio di Jerman, Italia, dan AS terbukti secara sebagian berhasil.

Permasalahan dalam metode ini adalah bahwa sinyal-sinyal dari semua teleskop radio haru digabungkan secara akurat dan kemudian diumpan ke komputer. Di masa lalu, ini amat sulit. Namun, dengan kedatangan Internet dan komputer berkecepatan tinggi yang murah, biayanya telah turun banyak. Hari ini, membuat teleskop radio seukuran planet Bumi bukan lagi fantasi.

Di AS, perangkat tercanggih yang mempergunakan teknologi interferensi ini adalah VLBA (*very long baseline array*), yaitu kumpulan 10 antena radio yang berlokasi di tempat berbeda-beda, meliputi New Mexico, Arizona, New Hampshire, Washington, Texas, Virgin Islands, dan Hawaii. Masing-masing stasiun VLBA memuat cakram besar berdiameter 82 kaki yang berbobot 240 ton dan setinggi bangunan 10 lantai. Sinyal-sinyal radio secara teliti direkam pada pita di masing-

masing lokasi, yang kemudian dikirim ke Socorro Operations Center, New Mexico, di mana mereka dikorelasikan dan dianalisis. Sistem ini berfungsi online pada 1993 dengan biaya $85 juta.

Mengkorelasikan data dari 10 lokasi ini menghasilkan teleskop radio raksasa dan efektif selebar 5.000 mil dan dapat menghasilkan beberapa citra tertajam di Bumi. Ini sama dengan berdiri di New York dan membaca suratkabar di Los Angeles. VLBA telah menghasilkan "film" jet kosmik dan ledakan supernova dan pengukuran jarak terakurat yang pernah dibuat atas objek di luar galaksi Bima Sakti.

Di masa depan, teleskop optik bahkan mungkin menggunakan kekuatan interferometri, walaupun ini sungguh sulit lantaran panjang gelombang cahaya yang pendek. Ada rencana untuk membawa data optis dari dua teleskop di Keck Observatory, Hawaii, dan menginterferensikannya, menghasilkan teleskop raksasa yang jauh lebih besar dari keduanya.

Mengukur Dimensi Kesebelas

Di samping mencari *dark matter* dan *black hole*, yang paling membangkitkan minat fisikawan adalah mencari dimensi ruang dan waktu yang lebih tinggi. Salah satu upaya paling ambisius untuk memverifikasi eksistensi alam semesta dekat dikerjakan di Universitas Colorado di Boulder. Para ilmuwan di sana mencoba mengukur penyimpangan dari hukum kuadrat terbalik Newton yang terkenal.

Menurut teori gravitasi Newton, gaya tarik di antara dua benda berkurang seiring kuadrat jarak yang memisahkan mereka. Bila Anda

menggandakan jarak dari Bumi ke Matahari, maka gaya gravitasi turun sebesar 2 kuadrat, atau 4. Ini, pada gilirannya, mengukur dimensionalitas ruang.

Sejauh ini, hukum gravitasi Newton berlaku pada jarak kosmologis yang melibatkan gugus-gugus besar galaksi. Tapi tak ada seorang pun yang menguji hukum gravitasinya hingga skala panjang kecil sebab amat sulit. Karena gravitasi adalah gaya yang demikian lemah, disturbansi sekecil apa pun dapat mengacaukan eksperimen. Bahkan truk yang lewat menghasilkan getaran cukup besar untuk menghapuskan eksperimen yang mencoba mengukur gravitasi di antara dua objek kecil.

Fisikawan di Colorado membangun instrumen halus, disebut resonator berfrekuensi tinggi, yang mampu menguji hukum gravitasi hingga sepersepuluh milimeter, pertama kalinya dilakukan pada skala demikian kecil. Eksperimen itu terdiri dari dua buluh tungsten sangat tipis yang digantung di ruang vakum. Salah satu buluh bergetar pada frekuensi 1.000 putaran per detik, terlihat seperti papan seluncur yang bergetar. Fisikawan kemudian mencari getaran yang ditransmisikan di ruang vakum ke buluh kedua. Pirantinya begitu sensitif sehingga dapat mendeteksi gerakan buluh kedua yang disebabkan oleh gaya sebesar sepermiliar berat sebutir pasir. Bila ada penyimpangan dalam hukum gravitasi Newton, maka semestinya terdapat disturbansi kecil yang terekam pada buluh kedua. Namun, setelah menganalisis jarak hingga seperseratus delapan juta meter, fisikawan tidak menemukan penyimpangan semacam itu. "Sampai sekarang, Newton memper-

tahankan kedudukannya," kata C. D. Hoyle dari Universitas Trento di Italia, yang menganalisis eksperimen tersebut untuk majalah *Nature*.

Hasil ini memang negatif, tapi ini telah merangsang selera fisikawan lain yang ingin menguji penyimpangan pada hukum Newton hingga level mikroskopis.

Eksperimen lain sedang direncanakan di Universitas Purdue. Fisikawan di sana ingin mengukur penyimpangan kecil dalam gravitasi Newton bukan pada level milimeter tapi pada level atom. Mereka berencana melakukan ini dengan memakai nanoteknologi untuk mengukur perbedaan antara nikel 58 dan nikel 64. Dua isotop ini mempunyai sifat listrik dan kimiawi yang identik, tapi isotop yang satu memiliki 6 neutron lebih banyak daripada isotop satunya lagi. Secara prinsip, satu-satunya perbedaan antara isotop-isotop ini adalah bobot mereka.

Para ilmuwan ini membayangkan membuat perangkat Casimir yang terdiri dari 2 set pelat netral yang terbuat dari dua isotop ini. Normalnya, ketika pelat-pelat ini disatukan secara rapat, tak ada yang akan terjadi sebab mereka tak punya muatan. Tapi mereka dirapatkan secara ekstrim, efek Casimir terjadi, dan kedua pelat sedikit tertarik, sebuah efek yang telah diukur di laboratorium. Tapi karena masing-masing set pelat paralel dibuat dari isotop nikel berbeda, mereka akan tertarik secara sedikit berbeda, tergantung gravitasi mereka.

Dalam rangka memaksimalkan efek Casimir, pelat harus dirapatkan secara ekstrim. (Efeknya berbanding terbalik dengan pangkat empat jarak keterpisahan. Karenanya, efek ini tumbuh pesat sewaktu

pelat disatukan.) Fisikawan Purdue akan memakai nanoteknologi untuk membuat pelat terpisah sebesar jarak atomik. Mereka akan memakai osilator torsi mikroelektromekanis canggih untuk mengukur osilasi kecil pada pelat. Perbedaan antara pelat nikel 58 dan nikel 64 kemudian dapat diatributkan pada gravitasi. Dengan cara ini, mereka berharap mengukur penyimpangan pada hukum gerak Newton hingga jarak atomik. Bila mereka menemukan penyimpangan dari hukum kuadrat terbalik Newton yang terkenal dengan perangkat cerdik ini, itu dapat mengisyaratkan keberadaan alam semesta dimensi tinggi yang terpisah dari dimensi kita sejauh ukuran atom.

Large Hadron Collider

Tapi perangkat yang mungkin menjawab banyak dari pertanyaan ini secara meyakinkan adalah LHC (Large Hadron Collider), kini mendekati perampungan di dekat Jenewa, Swiss, di laboratorium nuklir terkenal CERN. Tak seperti eksperimen terdahulu mengenai bentuk-bentuk materi aneh yang secara alami terdapat di dunia kita, LHC mungkin mempunyai cukup energi untuk menciptakannya langsung di laboratorium. LHC akan mampu memeriksa jarak amat kecil, hingga 10^{-19} meter, atau 10.000 kali lebih kecil dari proton, dan menciptakan temperatur yang tidak terlihat sejak *big bang*. "Fisikawan merasa yakin bahwa alam merahasiakan trik baru sehingga pasti terungkap dalam tubrukan itu—barangkali partikel eksotis yang dikenal sebagai boson Higgs, barangkali bukti adanya efek ajaib yang disebut supersimetri, atau barangkali sesuatu yang tak terduga yang

akan membalikkan fisika partikel teoritis," tulis Chris Llewellyn Smith, mantan direktur jendral CERN dan kini presiden University College di London. CERN telah memiliki 7.000 pengguna peralatannya, yang jumlahnya mencapai lebih dari separuh jumlah fisikawan partikel eksperimental di planet ini. Dan banyak dari mereka akan terlibat langsung dalam eksperimen-eksperimen LHC.

LHC merupakan mesin sirkuler canggih, berdiameter 27 kilometer, cukup besar untuk melingkungi sepenuhnya banyak kota di seluruh dunia. Terowongannya cukup panjang sehingga betul-betul mengangkangi perbatasan Prancis-Swiss. LHC begitu mahal sehingga membutuhkan konsorsium beberapa negara Eropa untuk membangunnya. Saat nantinya dinyalakan pada 2007, magnet-magnet kuat yang dirangkai sepanjang pipa sirkuler akan mendorong sorot proton bersirkulasi pada energi yang terus meningkat, sampai mereka mencapai sekitar 14 triliun eV.

Mesin ini terdiri dari ruang vakum sirkuler besar dengan magnet-magnet besar ditempatkan secara strategis di sepanjangnya untuk menekuk sorot bertenaga supaya melingkar. Sewaktu partikel-partikel bersirkulasi dalam pipa, energi disuntikkan ke dalam ruang vakum, meningkatkan kecepatan proton. Saat sorot akhirnya menghantam target, itu melepaskan ledakan radiasi raksasa. Fragmen-fragmen yang dihasilkan oleh tubrukan ini kemudian difoto oleh deretan detektor untuk mencari bukti adanya partikel subatom eksotis dan baru.

LHC betul-betul merupakan mesin raksasa. Sementara LIGO dan LISA unggul dari segi sensitifitas, LHC unggul dalam kekuatan kasar.

Magnet-magnet kuatnya, yang menekuk sorot proton menjadi busur anggun, membangkitkan medan 8,3 tesla, 160.000 kali lebih besar dari medan magnet Bumi. Untuk membangkitkan medan magnet sedahsyat itu, fisikawan membenturkan 12.000 ampere arus listrik ke serangkaian *coil* (kumparan), yang harus didinginkan sampai -271 derajat C, di mana gulungan kehilangan seluruh resistensi dan menjadi superkonduktor. Secara keseluruhan, mesin ini memiliki 1.232 magnet berpanjang 15 meter, yang ditempatkan di sepanjang 85% keliling mesin.

Dalam terowongan, proton-proton berakselerasi sampai 99,999999% kecepatan cahaya hingga mereka mengenai target, yang berlokasi di 4 tempat di sekeliling pipa, dengan demikian menghasilkan miliaran tubrukan setiap detik. Detektor-detektor besar ditempatkan di sana (yang terbesar adalah seukuran bangunan 6 lantai) guna menganalisis puing-puing dan memburu partikel subatom yang sukar dipahami.

Sebagaimana tadi disebutkan oleh Smith, salah satu sasaran LHC adalah menemukan boson Higgs yang sulit dipahami, yang merupakan kepingan terakhir Standard Model yang masih melepaskan diri dari penangkapan. Itu penting karena partikel ini bertanggung jawab atas kerusakan kesimetrian spontan dalam teori-teori partikel dan menimbulkan massa dunia quantum. Estimasi atas massa boson Higgs menempatkannya di antara 115 sampai 200 miliar eV (proton, kontrasnya, berbobot sekitar 1 miliar eV). (Tevatron, mesin jauh lebih kecil yang berlokasi di Fermilab, luar Chicago, sebenarnya bisa

menjadi akselerator pertama yang menjerat boson Higgs, jika massa partikel tersebut tidak terlalu berat. Secara prinsip, Tevatron dapat menghasilkan hingga 10.000 boson Higgs bila beroperasi sesuai rencana. Namun, LHC akan menghasilkan partikel-partikel berenergi tujuh kali lebih besar. Dengan memainkan 14 triliun eV, wajar LHC dapat menjadi "pabrik" boson Higgs, menciptakan jutaan partikel dalam tubrukan proton.)

Sasaran lain LHC adalah menciptakan kondisi yang tidak terlihat sejak *big bang*. Fisikawan khususnya percaya bahwa *big bang* awalnya terdiri dari kumpulan longgar quark-quark dan gluon-gluon amat panas, disebut plasma quark-gluon. LHC akan mampu menghasilkan plasma quark-gluon jenis ini, yang mendominasi alam semesta di 10 mikrodetik pertama eksistensinya. Di LHC, seseorang bisa menubrukkan nukleus timah berenergi 1,1 triliun eV. Dengan tubrukan sedahsyat itu, 400 proton dan neutron dapat "meleleh" dan membebaskan quark ke plasma panas ini. Dengan cara ini, kosmologi mungkin lambat-laun menjadi sains yang kurang observasional dan lebih eksperimental, dengan eksperimen-eksperimen akurat terhadap plasma quark-gluon yang dikerjakan secara tepat di laboratorium.

Terdapat pula harapan bahwa LHC akan menemukan mini-*black hole* di antara puing-puing yang dihasilkan oleh penubrukan proton secara bersama-sama pada energi fantastik, sebagaimana disebutkan di bab 7. Normalnya, pembentukan *black hole* quantum semestinya terjadi pada energi Planck, yang satu quadriliun kali melampaui energi LHC. Tapi bila alam semesta paralel eksis dalam jarak 1

milimeter dari alam semesta kita, ini menurunkan level energi terukurnya efek-efek gravitasi quantum, menaruh mini-*black hole* dalam jangkauan LHC.

Dan terakhir, masih terdapat harapan bahwa LHC akan mampu menemukan bukti adanya partikel supersimetri, yang akan menjadi terobosan bersejarah dalam fisika partikel. Partikel-partikel ini diyakini sebagai partner partikel biasa yang kita jumpai di alam. Walaupun teori string dan supersimetri memprediksikan bahwa tiap-tiap partikel subatom mempunyai "kembaran" berpusingan berbeda, partikel supersimetri belum pernah teramati di alam, mungkin karena mesin kita tidak cukup canggih untuk mendeteksinya.

Eksistensi superpartikel akan membantu menjawab dua pertanyaan bandel. Pertama, apakah teori string benar? Walaupun sangat sulit untuk mendeteksi string secara langsung, mungkin kita bisa mendeteksi oktaf atau resonansi rendah teori string. Jika partikel ditemukan, itu akan memberi justifikasi eksperimental pada teori string (walaupun ini masih belum akan menjadi bukti langsung atas kebenarannya).

Kedua, itu menjadi kandidat yang barangkali paling masuk akal untuk *dark matter*. Jika *dark matter* terdiri dari partikel-partikel subatom, mereka pasti stabil dan bermuatan netral (kalau tidak, mereka akan bisa dilihat), dan mereka pasti berinteraksi secara gravitasi. Tiga sifat ini dapat ditemukan di antara partikel-partikel yang diprediksikan oleh teori string.

LHC, yang akan menjadi akselerator partikel paling bertenaga saat

nanti dinyalakan, sebetulnya merupakan pilihan kedua bagi sebagian besar fisikawan. Pada 1980-an silam, Presiden Ronald Reagen menyetujui Supeconducting Supercollider (SSC), sebuah mesin dahsyat berkeliling 50 mil yang waktu itu direncanakan dibangun di luar Dallas, Texas; itu akan mengerdilkan LHC. Sementara LHC mampu menghasilkan tubrukan partikel dengan energi 14 triliun eV, SSC dirancang untuk menghasilkan tubrukan dengan energi 40 triliun eV. Proyek itu pada awalnya disetujui tapi, di hari-hari terakhir rapat dengar pendapat, Kongres AS tiba-tiba membatalkannya. Itu merupakan tamparan besar untuk fisika *high-energy* dan memundurkan bidang tersebut selama satu generasi penuh.

Perdebatan yang muncul terutama terkait biaya $11 milar untuk mesin dan prioritas sains yang lebih besar. Komunitas ilmiah sendiri parahnya terpecah terkait SSC itu, beberapa fisikawan mengklaim bahwa SSC dapat menghabiskan dana dari penelitian mereka. Kontroversi tumbuh memanas sampai-sampai *New York Times* pun menulis editorial kritis mengenai bahaya bahwa "sains besar" akan mencekik "sains kecil". (Argumen ini menyesatkan, karena anggaran SSC datang dari sumber berbeda-beda dibanding anggaran untuk sains kecil. Kompetitor nyata untuk pendanaan adalah Space Station, yang dirasakan oleh banyak ilmuwan sebagai penghamburan uang yang nyata.)

Tapi jika ditilik kembali, kontroversi itu adalah menyangkut pembelajaran untuk berbicara kepada masyarakat dengan bahasa yang mereka pahami. Sedikit banyak, dunia fisika terbiasa mendapat-

kan *atom smasher* monster yang disetujui oleh Kongres lantaran Rusia membangunnya juga. Rusia, kenyataannya, membangun akselerator UNK mereka untuk bersaing dengan SSC. Gengsi dan kehormatan negara dipertaruhkan. Tapi Uni Soviet pecah, mesin mereka dibatalkan, dan perlahan-lahan program SSC tak berpengaruh.

Akselerator Meja

Dengan LHC, fisikawan lambat-laun mendekati batas atas energi yang bisa dicapai dengan akselerator generasi masa kini, yang sekarang mengerdilkan banyak kota modern dan berbiaya miliaran dolar. Mereka begitu besar sehingga hanya konsorsium besar negara-negara yang dapat menjangkaunya. Dibutuhkan ide dan prinsip baru jika kita hendak menekan rintangan yang dihadapi akselerator konvensional. Piala suci untuk fisikawan partikel adalah menciptakan akselerator "meja" yang dapat menghasilkan sorot dengan energi miliaran eV dengan ukuran dan biaya jauh lebih kecil dibanding akselerator konvensional.

Untuk memahami permasalahan, bayangkan sebuah perlombaan estafet, di mana para pelari tersebar di sekeliling jalur lari bundar yang sangat besar. Para pelari bertukar tongkat selagi berlomba mengelilingi jalur. Nah bayangkan setiap kali tongkat diserahkan dari satu pelari ke pelari lainnya, para pelari itu mendapat ledakan energi tambahan, sehingga mereka berlari berturut-turut secara lebih cepat di sepanjang jalur.

Ini serupa dengan akselerator partikel, di mana tongkat terdiri dari

sorot partikel subatom bergerak mengelilingi jalur sirkuler. Setiap kali sorot dilontarkan dari satu pelari ke pelari lain, sorot tersebut menerima suntikan energi frekuensi radio (RF), mengakselerasinya sehingga lebih cepat. Beginilah akselerator partikel dibangun selama separuh abad terakhir. Permasalahan akselerator partikel konvensional adalah bahwa kita sedang mencapai batas energi RF yang bisa digunakan untuk menggerakkan akselerator.

Untuk memecahkan permasalahan ini, ilmuwan melakukan eksperimen pemompaan energi ke sorot dengan cara yang sama sekali berbeda, seperti dengan sinar laser kuat, yang kekuatannya tumbuh secara eksponensial. Keunggulan sinar laser adalah bahwa ia bersifat "koheren"—yakni, semua gelombang cahayanya bervibrasi persis secara berbarengan, memungkinkannya untuk menghasilkan sinar yang luar biasa kuat. Hari ini, sinar laser dapat membangkitkan ledakan energi yang memuat daya triliunan watt (terrawatt) dalam waktu yang singkat. (Kontrasnya, pembangkit listrk tenaga nuklir hanya membangkitkan daya semiliar watt saja, tapi pada laju tetap.) Laser yang membangkitkan hingga seribu triliun watt (satu quadriliun watt, atau satu petawatt) kini tersedia.

Akselerator laser bekerja berdasarkan prinsip berikut. Sinar laser cukup panas untuk menciptakan gas plasma (sekumpulan atom terionisasi), yang kemudian bergerak pada kecepatan tinggi dalam osilasi mirip gelombang, seperti gelombang pasang. Kemudian sorot partikel subatom "menyelancar" jaluran ombak yang dihasilkan oleh gelombang plasma ini. Dengan menyuntikkan lebih banyak energi

laser, gelombang plasma bergerak pada kecepatan lebih tinggi, mendorong sorot partikel yang berselancar di atasnya. Baru-baru ini, dengan menembakkan laser 50 terrawatt ke target padat, para ilmuwan di Rutherford Appleton Laborator, Inggris, menghasilkan sorot proton yang muncul dari target bermuatan energi hingga 400 juta eV dalam tubrukan *collimated beam* (sorot paralel). Di École Polytechnique, Paris, fisikawan telah mengakselerasi elektron hingga 200 juta eV sampai jarak satu milimeter.

Akselerator partikel yang diciptakan sejauh ini berukuran kecil sekali dan tidak cukup tangguh. Tapi untuk sementara anggap saja bahwa akselerator ini dapat dinaikkan supaya beroperasi tidak hanya sampai jarak satu milimeter tapi satu meter. Dengan begitu, ia akan sanggup mengakselerasi elektron hingga 200 giga eV sampai jarak satu meter, memenuhi cita-cita akselerator meja. Tonggak bersejarah lainnya tercapai pada 2001, ketika fisikawan di SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) mampu mengakselerasi elektron sampai jarak 1,4 meter. Bukannya menggunakan sinar laser, mereka menciptakan gelombang plasma dengan menyuntikkan sorot partikel bermuatan. Walaupun energi yang dicapai rendah, itu menunjukkan bahwa gelombang plasma dapat mengakselerasi partikel sampai jarak satu meter.

Kemajuan dalam bidang penelitian menjanjikan ini luar biasa pesat: energi yang dicapai oleh akselerator-akselerator ini tumbuh sebesar faktor 10 setiap lima tahun. Dengan laju ini, prototipe akselerator meja mungkin sudah dalam jangkauan. Jika berhasil, itu

mungkin akan membuat LHC terlihat seperti dinosaurus terakhir. Walaupun menjanjikan, tentu saja terdapat banyak rintangan yang dihadapi akselerator meja semacam itu. Seperti peselancar yang "mengganyang" menunggangi gelombang lautan berbahaya, mempertahankan sorot agar menunggangi gelombang plasma secara benar adalah sesuatu yang sulit (permasalahannya meliputi pemfokusan sorot dan pemeliharaan stabilitas dan intensitasnya). Tapi tak ada dari permasalahan ini yang rasanya tak bisa diatasi.

Masa Depan

Terdapat beberapa kemungkinan dalam membuktikan teori string. Edward Witten menyimpan harapan bahwa, pada jenak *big bang*, alam semesta mengembang begitu pesat sehingga mungkin sebuah string mengembang bersamanya, meninggalkan string berukuran besar yang melayang di ruang angkasa. Dia merenungkan, "Walaupun agak fantastis, ini merupakan skenario favorit saya untuk mengkonfirmasikan teori string, sebab tak ada yang akan menjawab isu tersebut secara sungguh dramatis dibanding melihat string dengan teleskop."

Brian Green mendaftarkan lima kemungkinan contoh data eksperimen yang dapat mengkonfirmasikan teori string atau setidaknya memberinya kredibilitas:

1. Massa kecil neutrino dapat ditetapkan secara eksperimen, dan teori string mungkin menjelaskannya.
2. Pelanggaran kecil Standard Model yang melanggar fisika partikel titik dapat ditemukan, seperti peluruhan partikel subatom

tertentu.

3. Gaya jarak jauh baru (selain gravitasi dan elektromagnetisme) dapat ditemukan secara eksperimen, yang akan mengisyaratkan pilihan tertentu atas manifold Calabi-Yau.
4. Partikel *dark matter* dapat ditemukan di laboratorium dan diperbandingkan dengan teori string.
5. Teori string mungkin mampu mengkalkulasi jumlah *dark energy* di alam semesta.

Pandangan saya sendiri adalah bahwa verifikasi teori string mungkin sepenuhnya datang dari matematika murni, ketimbang eksperimen. Karena teori string diduga merupakan *theory of everything*, semestinya ia adalah teori tentang energi sehari-hari serta energi kosmik juga. Dengan demikian, jika kita nantinya bisa memecahkan teori ini sepenuhnya, kita semestinya mampu mengkalkulasi sifat/atribut objek-objek biasa, bukan hanya objek eksotis yang ditemukan di angkasa luar. Contoh, jika teori string dapat mengkalkulasi massa proton, neutron, dan elektron dari prinsip pertama, ini akan menjadi pencapaian besar pertama. Dalam semua model fisika (kecuali teori string), massa partikel-partikel familiar ini diselipkan oleh tangan [bukan berdasar eksperimen]. Kita tak memerlukan LHC, dalam beberapa hal, untuk memverifikasi teori tersebut, karena kita sudah mengetahui massa banyak partikel subatom, yang kesemuanya semestinya ditetapkan oleh teori string tanpa parameter yang bisa disetel-setel.

Sebagaimana Einstein katakan, "Saya yakin kita dapat menemukan,

dengan memakai konstruksi matematis murni, konsep dan hukum...yang menyediakan kunci menuju pemahaman atas fenomena alam. Pengalaman mungkin menyiratkan konsep matematis yang cocok, tapi konsep tersebut hampir pasti tidak dapat disimpulkan darinya... Dalam hal tertentu, karenanya, saya beranggapan bahwa pemikiran murni bisa memahami realitas, sebagaimana diimpikan oleh orang-orang di masa lampau."

Jika benar, maka barangkali teori-M (atau teori apa pun yang akhirnya membawa kita kepada teori gravitasi quantum) akan memungkinkan dilakukannya perjalanan menentukan bagi semua makhluk berakal di alam semesta, lari dari alam semesta sekarat kita triliunan tahun kelak menuju rumah baru.

BAGIAN 3
Lari ke Hyperspace

Bab 10
Akhir Segalanya

> [Pertimbangkan] pandangan yang kini dipegang oleh kebanyakan fisikawan, yaitu bahwa matahari dengan semua planetnya seiring waktu akan terlalu dingin bagi kehidupan, kecuali jika memang suatu benda besar melompat ke dalam matahari dan dengan demikian memberinya kehidupan baru—seraya percaya, seperti halnya saya, bahwa manusia di masa depan akan menjadi makhluk yang jauh lebih sempurna daripada sekarang, adalah pemikiran yang tidak bisa ditolerir bahwa ia dan makhluk berperasaan lainnya ditakdirkan untuk mengalami pembinasaan menyeluruh setelah kemajuan lamban yang demikian panjang dan terus-menerus.
>
> —Charles Darwin

Menurut legenda Norse, hari perhitungan akhir, atau Ragnarok, atau Masa Senja para dewa, akan diiringi oleh pergolakan besar. Midgard (Bumi Pertengahan) dan langit akan terjepit dalam cengkraman embun beku yang menggigilkan. Angin yang menusuk, badai salju yang mengaburkan, gempa bumi yang menghancurkan, serta kelaparan akan mengancam negeri, sementara pria dan wanita binasa tak berdaya dalam jumlah besar. Tiga musim dingin demikian

akan melumpuhkan bumi, tanpa ada pertolongan, sementara serigala-serigala rakus memakan habis matahari dan bulan, menjerumuskan dunia ke dalam kegelapan total. Bintang-bintang di langit akan jatuh, bumi akan bergetar, dan gunung-gunung akan hancur. Monster-monster akan terbebas, sementara dewa *chaos*, Loki, lepas, menyebarkan peperangan, kebingungan, dan perpecahan ke seluruh negeri yang suram.

Odin, bapak para dewa, akan menyusun prajurit pemberaninya untuk terakhir kalinya di Valhalla untuk konflik penghabisan. Pada akhirnya, setelah para dewa mati satu per satu, dewa jahat Surtur akan meniupkan api dan belerang, menyalakan neraka raksasa yang akan melanda langit maupun bumi. Selagi seluruh alam semesta diliputi kobaran api, bumi terbenam ke dalam lautan, dan waktu sendiri berhenti.

Tapi dari abu raksasa, keluar permulaan baru. Bumi baru, tak seperti yang lama, perlahan-lahan timbul dari laut, sementara buah-buahan baru dan tumbuhan eksotis muncul banyak sekali dari tanah yang subur, melahirkan ras manusia baru.

Legenda Viking tentang kebekuan raksasa yang disusul oleh api dan pertempuran penghabisan ini menyajikan kisah seram akhir dunia. Dalam mitologi di seluruh dunia, tema serupa dapat dijumpai. Akhir dunia diiringi oleh bencana iklim hebat, biasanya kebakaran besar, gempa bumi, atau badai salju, yang disusul oleh pertempuran penghabisan antara kebenaran dan kejahatan. Tapi terdapat pesan harapan pula. Dari abu muncul pembaharuan.

Ilmuwan, dihadapkan dengan hukum fisika yang dingin, kini harus berkonfrontasi dengan tema serupa. Data kuat, bukan bisikan mitologi, mendikte bagaimana ilmuwan memandang akhir alam semesta. Tapi tema serupa mungkin berlaku di dunia ilmiah. Di antara solusi persamaan Einstein, kita juga melihat kemungkinan masa depan yang melibatkan kondisi dingin membekukan, api, bencana, dan sebuah akhir alam semesta. Tapi akankah ada kelahiran ulang?

Menurut gambaran yang muncul dari satelit WMAP, gaya antigravitasi misterius sedang mempercepat perluasan alam semesta. Jika itu terus berlanjut selama miliaran atau triliunan tahun, alam semesta tak pelak lagi akan mencapai *big freeze* yang mirip dengan badai salju tanda periode penghancuran oleh para dewa, mengakhiri seluruh kehidupan yang kita kenal. Gaya antigravitasi ini mendorong galaksi-galaksi saling menjauh, yang pada gilirannya meningkatkan volume alam semesta. Siklus tak berujung-pangkal ini berulang tiada akhir, sampai alam semesta memasuki mode tak terkendali dan bertambah cepat secara eksponensial.

Akhirnya, ini akan mengandung arti bahwa 36 galaksi di kelompok galaksi lokal akan menyusun keseluruhan alam semesta tampak, sementara galaksi-galaksi tetangga mencepat melewati horison peristiwa kita. Dengan ruang di antara galaksi-galaksi mengembang lebih cepat dari kecepatan cahaya, alam semesta akan amat lengang. Temperatur akan jatuh, sementara energi yang tersisa akan tersebar semakin tipis di sepanjang angkasa. Karena temperatur jatuh mendekati nol absolut, spesies berakal akan harus menghadapi takdir

terakhirnya: mati kedinginan.

Tiga Hukum Termodinamika

Jika seluruh dunia adalah panggung, sebagaimana kata Shakespeare, maka pada akhirnya harus ada babak 3. Di babak 1, kita mengalami *big bang* dan kelahiran kehidupan dan kesadaran di Bumi. Di babak 2, kita barangkali akan menjelajah bintang dan galaksi. Terakhir, di babak 3, kita menghadapi kematian penghabisan alam semesta dalam *big freeze*.

Akhirnya, kita menemukan bahwa naskah harus mengikuti hukum termodinamika. Di abad 19, fisikawan merumuskan tiga hukum termodinamika yang mengatur fisika panas/kalor dan mulai merenungkan kematian akhir alam semesta. Pada 1854, fisikawan besar Jerman, Hermann von Helmholtz, menyadari bahwa hukum termodinamika dapat diterapkan pada alam semesta secara keseluruhan, artinya segala sesuatu di sekeliling kita, termasuk bintang dan galaksi, pada akhirnya harus mati.

Hukum pertama menyatakan bahwa jumlah total materi dan energi adalah kekal. Walaupun energi dan materi bisa berubah menjadi satu sama lain (lewat persamaan terkenal Einstein, $E = mc^2$), jumlah total materi dan energi takkan pernah bisa diciptakan atau dihancurkan.

Hukum kedua adalah yang paling misterius dan mendalam. Ia menyatakan bahwa jumlah total entropi (kekacauan atau ketidak-teraturan) di alam semesta senantiasa meningkat. Dengan kata lain, segala sesuatu pada akhirnya pasti menua dan mati. Kebakaran hutan,

pengkaratan mesin, keruntuhan kekaisaran, dan penuaan tubuh manusia semuanya melambangkan peningkatan entropi di alam semesta. Adalah mudah, misalnya, untuk membakar sehelai kertas. Ini melambangkan peningkatan netto kekacauan total. Namun, mustahil untuk merangkai asap kembali menjadi kertas. (Entropi bisa dibuat menurun dengan menambahkan kerja mekanis, seperti pada lemari es, tapi hanya di lingkungan lokal kecil; entropi total untuk keseluruhan sistem—lemari es plus semua hal di sekelilingnya—selalu meningkat.)

Arthur Eddington pernah mengatakan mengenai hukum kedua ini: "Saya pikir hukum yang menyatakan bahwa entropi selalu meningkat —Hukum Termodinamika Kedua—memegang kedudukan tertinggi di antara hukum-hukum Alam... Jika teori Anda didapati bertentangan dengan Hukum Termodinamika Kedua, Anda tak punya harapan; tak ada hal lain baginya kecuali gagal dengan penghinaan terdalam."

(Mulanya, eksistensi bentuk kehidupan kompleks di Bumi seolah-olah melanggar hukum kedua. Sungguh menakjubkan bahwa dari *chaos* Bumi awal muncul keanekaragaman bentuk kehidupan rumit yang luar biasa, bahkan mempunyai keberakalan dan kesadaran, menurunkan jumlah entropi. Beberapa orang mengambil keajaiban ini untuk mengindikasikan adanya tangan pencipta yang penuh kebaikan. Tapi ingat bahwa kehidupan digerakkan oleh hukum evolusi alami, dan bahwa entropi total masih meningkat, sebab energi tambahan yang menghidupkan kehidupan terus-menerus ditambah-kan oleh Matahari. Jika kita memasukkan Matahari dan Bumi, maka

entropi total masih meningkat.)

Hukum ketiga menyatakan bahwa tidak ada lemari es yang bisa mencapai nol absolut. Seseorang mungkin menjangkau sepecahan kecil derajat di atas nol absolut, tapi Anda takkan pernah bisa mencapai status gerak nol. (Dan bila kita memasukkan prinsip quantum, ini mengimplikasikan bahwa molekul-molekul akan selalu mempunyai jumlah energi yang kecil, sebab energi nol mengimplikasikan bahwa kita mengetahui lokasi dan kecepatan persis masing-masing molekul, melanggar prinsip ketidakpastian.)

Jika hukum kedua diterapkan pada seluruh alam semesta, itu berarti alam semesta pada akhirnya akan mati. Bintang-bintang akan kehabisan bahan bakar nuklir mereka, galaksi-galaksi akan berhenti menerangi langit, dan alam semesta akan tersisa sebagai kumpulan bintang kerdil, bintang neutron, dan *black hole* mati. Alam semesta akan diliputi kegelapan abadi.

Beberapa kosmolog mencoba menghindari "kematian panas" ini dengan berlari kepada [model] alam semesta berosilasi. Entropi akan meningkat terus-menerus selagi alam semesta mengembang dan akhirnya berkontraksi. Tapi setelah *big crunch*, tidak jelas akan bagaimana entropi di alam semesta. Beberapa kosmolog mempunyai ide bahwa barangkali alam semesta mengulangi dirinya secara sama persis dalam siklus berikutnya. Yang lebih realistis adalah kemungkinan bahwa entropi akan dibawa ke siklus berikutnya, yang artinya umur hidup alam semesta akan secara bertahap memanjang untuk setiap siklus. Tapi tak peduli bagaimanapun seseorang

memandang pertanyaan tersebut, alam semesta berosilasi, seperti halnya alam semesta terbuka dan tertutup, pada akhirnya akan menghasilkan kehancuran semua makhluk berakal.

Big Crunch

Salah satu upaya pertama untuk mempergunakan fisika untuk menjelaskan akhir alam semesta adalah sebuah makalah yang ditulis pada 1969 oleh Sir Martin Rees yang berjudul "*The Collapse of the Universe: An Eschatological Study*". Saat itu, harga Omega sebagian besar masih belum diketahui, jadi dia mengasumsikannya berharga 2, artinya alam semesta pada akhirnya akan berhenti mengembang dan mati dalam *big crunch* daripada *big freeze*.

Dia mengkalkulasikan bahwa perluasan alam semesta pada akhirnya akan berhenti, saat galaksi-galaksi berjauhan dua kali lipat dari keadaan mereka sekarang, saat gravitasi akhirnya mengatasi perluasan alam semesta. Ingsutan merah yang kita saksikan di angkasa akan menjadi ingsutan biru, sementara galaksi-galaksi mulai berpacu ke arah kita.

Menurut versi ini, sekitar 50 miliar tahun dari sekarang, peristiwa katastropis akan terjadi, mengisyaratkan kesekaratan alam semesta. Seratus juta tahun sebelum *final crunch* (pengunyahan/pemamahan akhir), galaksi-galaksi di alam semesta, termasuk galaksi Bima Sakti kita sendiri, akan mulai saling bertubrukan dan akhirnya bergabung. Anehnya, Rees menemukan bahwa bintang-bintang individual akan lenyap sebelum mulai saling bertubrukan, karena dua alasan.

Pertama, radiasi dari bintang lain di angkasa akan mendapat energi selagi alam semesta berkontraksi; dengan demikian, bintang-bintang akan bermandikan cahaya ingsutan biru panas bintang lain. Kedua, temperatur radiasi gelombang mikro latar akan sangat meningkat selagi temperatur alam semesta membumbung. Kombinasi dua efek ini akan menciptakan temperatur yang melebihi temperatur permukaan bintang-bintang, yang akan menyerap panas lebih cepat daripada ketika melepaskannya. Dengan kata lain, bintang-bintang kemungkinan akan berdisintegrasi dan berpencar menjadi awan gas superpanas.

Makhluk berakal, di bawah keadaaan ini, tak pelak lagi akan musnah, hangus oleh panas kosmik yang melimpah dari bintang dan galaksi dekat. Tak ada tempat untuk melarikan diri. Sebagaimana ditulis Freeman Dyson, "Dengan menyesal, saya harus setuju bahwa dalam kasus ini kita tak dapat melarikan diri dari penggorengan. Tak peduli seberapa dalam kita menggali Bumi untuk melindungi diri dari radiasi ingsutan biru latar, kita hanya bisa menunda akhir menyedihkan kita beberapa juta tahun saja."

Jika alam semesta sedang menuju *big crunch*, maka pertanyaan yang tersisa adalah apakah alam semesta akan kolaps dan kemudian melambung, sebagaimana dalam [model] alam semesta berosilasi. Skenario ini diadopsi dalam novel karangan Poul Anderson, *Tau Zero*. Seandainya alam semesta sesuai dengan prinsip Newtonian, ini memang mungkin, jika ada cukup gerak menyamping selagi galaksi-galaksi termampatkan menuju satu sama lain. Dalam kasus ini,

bintang-bintang mungkin tidak diremas menjadi titik tunggal melainkan saling meluputkan pada titik pemampatan maksimum dan kemudian melambung, tanpa bertubrukan dengan satu sama lain.

Namun, alam semesta tidaklah sesuai dengan prinsip Newtonian; ia mematuhi persamaan Einstein. Roger Penrose dan Stephen Hawking menunjukkan bahwa, di bawah keadaan sangat umum, kumpulan galaksi yang kolaps pasti akan diremas menuju singularitas. (Ini lantaran gerak menyamping galaksi-galaksi mengandung energi dan karenanya berinteraksi dengan gravitasi. Dengan demikian, tarikan gravitasi dalam teori Einstein jauh lebih besar daripada yang ditemukan dalam teori Newton untuk kekolapsan alam semesta, dan alam semesta kolaps menjadi titik tunggal.)

Lima Tahap Alam Semesta

Namun, data mutakhir dari satelit WMAP lebih menyokong *big freeze*. Untuk menganalisis sejarah hidup alam semesta, ilmuwan seperti Fred Adams dan Greg Laughlin dari Universitas Michigan telah mencoba membagi umur alam semesta ke dalam 5 kondisi berbeda. Karena kita sedang membahas skala waktu yang betul-betul besar, kita akan mengadopsi kerangka waktu logaritma. Jadi, 10^{20} tahun akan dilambangkan sebagai 20. (Daftar waktu ini disusun sebelum implikasi akselerasi alam semesta disadari sepenuhnya. Tapi perincian umum tahap-tahap alam semesta masih sama.)

Pertanyaan yang menghantui kita adalah: bisakah makhluk berakal memakai kecerdikannya untuk bertahan melewati tahap-tahap ini,

melewati serangkaian malapetaka alami dan bahkan kematian alam semesta?

Tahap 1: Era Primordial

Di tahap pertama (antara -50 sampai 5, atau antara 10^{-50} sampai 10^{5} detik), alam semesta mengalami perluasan pesat serta juga pendinginan pesat. Selagi mendingin, berbagai gaya, yang sebelumnya "supergaya" induk tunggal, perlahan-lahan berpisah, menghasilkan empat gaya familiar hari ini. Gravitasi lepas pertama kali, lalu gaya nuklir kuat, dan terakhir gaya nuklir lemah. Mulanya, alam semesta berwarna *opaque* (buram) dan langit berwarna putih, karena cahaya diserap segera setelah terbentuk. Tapi 380.000 tahun setelah *big bang*, alam semesta cukup mendingin bagi atom-atom untuk terbentuk tanpa dihancurkan oleh panas intens. Langit berubah hitam. Radiasi gelombang mikro latar berawal dari periode ini.

Selama era ini, hidrogen primordial berfusi menjadi helium, menghasilkan campuran bahan bakar bintang masa kini yang tersebar di alam semesta. Pada tahap evolusi alam semesta ini, kehidupan adalah mustahil. Panas yang ada terlalu intens; DNA atau molekul autokatalitis yang terbentuk akan pecah terpisah oleh tubrukan acak dengan atom lain, membuat bahan kimiawi stabil kehidupan menjadi mustahil.

Tahap 2: Era Berbintang

Di sini, kita hidup di tahap 2 (antara 6 sampai 14, atau antara 10^{6}

sampai 10^{14} detik), ketika gas hidrogen telah termampatkan dan bintang-bintang telah memanas dan menyala, menerangi angkasa. Di era ini, kita menemukan bintang kaya hidrogen yang berkobar-kobar selama miliaran tahun hingga mereka kehabisan bahan bakar nuklir mereka. Teleskop antariksa Hubble telah memotret bintang-bintang di semua tahap evolusi mereka, termasuk bintang-bintang muda yang dikelilingi oleh cakram debu dan puing yang berputar, mungkin merupakan pendahulu planet dan tata surya.

Di tahap ini, kondisinya ideal untuk pembentukan DNA dan kehidupan. Berdasarkan jumlah bintang yang banyak di alam semesta tampak, astronom telah mencoba memberikan argumen masuk akal, berbasis hukum sains yang dikenal, tentang berkembangnya makhluk berakal di sistem planet lain. Tapi bentuk makhluk berakal apa pun harus menghadapi sejumlah rintangan kosmik, yang kebanyakannya dibuat sendiri, seperti polusi lingkungan, pemanasan global, dan senjata nuklir. Sekalipun makhluk berakal tidak merusak dirinya sendiri, maka ia harus menghadapi serangkaian bencana alam menakutkan, yang salah satunya mungkin berakhir dengan malapetaka.

Pada skala waktu puluhan ribu tahun, mungkin akan terdapat zaman es, serupa dengan yang mengubur Amerika Utara di bawah hampir satu mil es, menjadikan peradaban manusia mustahil. Sebelum sepuluh ribu tahun silam, manusia hidup seperti kerumunan serigala yang berkeliaran kesana kemari untuk mencari sisa-sisa makanan di suku-suku kecil terpencil. Tidak ada pengumpulan

pengetahuan atau sains. Tidak ada penulisan ucapan. Manusia diasyikkan dengan satu tujuan: bertahan hidup. Lalu, untuk alasan yang masih belum kita pahami, Zaman Es berakhir, dan manusia memulai kenaikan pesat dari es menuju bintang. Namun, periode interglasial singkat ini tidak dapat berlangsung selamanya. Mungkin dalam sepuluh ribu tahun ke depan, Zaman Es lain akan menyelimuti sebagian besar dunia. Geolog percaya bahwa efek-efek perubahan kecil dalam putaran Bumi pada porosnya akhirnya akan bertambah, memungkinkan arus air dari kantong-kantong es turun ke kawasan rendah, menyelimuti Bumi dengan es membekukan. Pada titik itu, kita mungkin harus pergi ke bawah tanah supaya tetap hangat. Bumi pernah ditutupi es sepenuhnya. Ini mungkin akan terjadi lagi.

Pada skala waktu ribuan hingga jutaan tahun, kita harus bersiap-siap menghadapi tubrukan meteor dan komet. Kemungkinan besar seperti tubrukan meteor atau komet yang memusnahkan dinosaurus 65 juta tahun silam. Ilmuwan percaya bahwa sebuah objek dari luar bumi, mungkin berdiameter kurang dari 10 mil, menubruk Semenanjung Yucatan di Meksiko, menciptakan kawah berdiameter 180 mil dan melepaskan cukup banyak puing ke atmosfer hingga memangkas cahaya matahari dan mempergelap Bumi, menghasilkan temperatur membekukan yang membinasakan vegetasi dan bentuk kehidupan dominan di Bumi pada waktu itu, dinosaurus. Dalam waktu kurang dari setahun, dinosaurus dan sebagian besar spesies di Bumi musnah.

Menilai berdasarkan angka tubrukan di masa lalu, terdapat

kemungkinan 1 banding 100.000 dalam 50 tahun ke depan untuk adanya tubrukan asteorid yang akan menyebabkan kerusakan di seluruh dunia. Kemungkinan tubrukan besar dalam jutaan tahun ke depan barangkali bertambah mendekati 100%.

(Di tata surya bagian dalam, di mana Bumi bertempat tinggal, mungkin terdapat 1.000 sampai 1.500 asteorid yang berdiameter satu kilometer atau lebih, dan satu juta asteorid yang berdiameter 50 meter atau lebih. Observasi asteorid melimpah di Smithsonian Astrophysical Observatory di Cambridge pada angka sekitar 15.000 asteorid per hari. Untungnya, hanya 42 asteorid dikenal yang memiliki probabilitas kecil tapi terbatas untuk bertubrukan dengan Bumi. Di masa lalu, ada sejumlah peringatan palsu menyangkut asteorid-asteorid ini, yang paling terkenal melibatkan asteorid 1997XFII, yang secara keliru dikatakan oleh astronom akan menghantam Bumi dalam waktu 30 tahun berikutnya, hingga menjadi tajuk utama di seluruh dunia. Tapi dengan memeriksa orbit sebuah asteorid bernama 1950DA secara teliti, ilmuwan mengkalkulasikan bahwa hanya terdapat probabilitas kecil—tapi tidak nol—bahwa ia akan menghantam Bumi pada 16 Maret 2880. Simulasi komputer yang dilakukan di Universitas California, Santa Cruz, menunjukkan bahwa, jika asteorid ini menghantam lautan, itu akan menghasilkan gelombang pasang setinggi 400 kaki, yang akan menenggelamkan sebagian besar area pantai dalam banjir merusak.)

Pada skala miliaran tahun, kita harus mencemaskan penelanan Bumi oleh Matahari. Hari ini Matahari sudah 30% lebih panas

dibanding masa awalnya dulu. Studi komputer menunjukkan bahwa, dalam 3 sampai 5 miliar tahun ke depan, Matahari akan 40% lebih cerlang daripada hari ini, artinya Bumi lambat-laun akan memanas. Matahari akan terlihat semakin besar di langit siang, hingga memenuhi sebagian besar langit dari horison ke horison. Dalam jangka pendek, makhluk hidup, yang mati-matian mencoba melarikan diri dari panas Matahari yang membakar, akan terpaksa mundur ke lautan, membalikkan kemajuan evolusi bersejarah di planet ini. Pada akhirnya, lautan sendiri akan mendidih, membuat kehidupan yang kita kenal menjadi mustahil. Dalam sekitar 5 miliar tahun ke depan, inti Matahari akan kehabisan persediaan gas hidrogennya dan bermutasi menjadi bintang raksasa merah. Beberapa raksasa merah berukuran begitu besar sampai-sampai bisa menelan habis Mars seandainya mereka berlokasi di posisi Matahari kita. Namun, Matahari kita mungkin hanya akan mengembang menjadi seukuran orbit Bumi, melahap Merkurius dan Venus dan melelehkan gunung-gunung Bumi. Jadi kemungkinannya Bumi kita akan mati dalam api, ketimbang es, menyisakan bara api hangus yang mengorbit Matahari.

Beberapa fisikawan berargumen bahwa sebelum ini terjadi, kita pasti mampu menggunakan teknologi canggih untuk memindahkan Bumi ke orbit lebih besar di sekeliling Matahari, bilamana kita belum bermigrasi dari Bumi ke planet lain dengan bahtera antariksa raksasa. “Selama manusia semakin pintar secara lebih cepat dari laju mencerlangnya Matahari, Bumi pasti berkembang pesat,” ucap astronom dan penulis Ken Croswell.

Ilmuwan telah mengajukan beberapa cara untuk memindahkan Bumi dari orbitnya di sekeliling Matahari. Satu cara sederhana adalah mengalihkan secara hati-hati sederetan asteroid dari sabuk asteroid agar mereka mendorong/mendera Bumi. Efek katapel ini akan memberikan dorongan pada orbit Bumi, menaikkan jaraknya dari Matahari. Setiap dorongan akan memindahkan Bumi secara meningkat, tapi diperlukan banyak waktu untuk mengalihkan ratusan asteroid untuk menyelesaikan tindakan ini. "Selama beberapa miliar tahun sebelum Matahari mengembung menjadi raksasa merah, keturunan kita bisa menjerat bintang-bintang yang lewat supaya masuk ke orbit di sekeliling Matahari, kemudian membuang Bumi dari orbit suryanya ke sebuah orbit di sekeliling bintang baru," tambah Croswell.

Matahari kita akan mengalami takdir berbeda dari Bumi; ia akan mati dalam es, ketimbang api. Akhirnya, setelah pembakaran helium selama 700 juta tahun sebagai raksasa merah, Matahari akan kehabisan sebagian besar bahan bakar nuklirnya, dan gravitasi akan memampatkannya menjadi bintang kerdil putih yang kira-kira seukuran Bumi. Matahari kita akan terlalu kecil untuk menjalani malapetaka bernama supernova dan berubah menjadi *black hole*. Setelah Matahari kita berubah menjadi bintang kerdil putih, ia akhirnya akan mendingin, dengan demikian memancarkan warna merah redup, lalu cokelat, dan akhirnya hitam. Ia akan mengeluyur di kehampaan kosmik sebagai sepotong abu nuklir yang mati. Masa depan hampir semua atom yang kita lihat di sekitar kita, termasuk

atom-atom tubuh kita dan tubuh orang-orang yang kita cintai, adalah berakhir di bara api hangus yang mengorbit bintang kerdil hitam. Karena bintang kerdil ini akan berbobot 0,55 massa surya saja, apa-apa yang tersisa dari Bumi akan mengendap ke orbit yang kurang-lebih 70% lebih besar daripada sekarang.

Pada skala ini, kita mengerti bahwa mekarnya tumbuhan dan binatang di Bumi hanya akan berlangsung satu miliar tahun saja (dan kita sedang separuh jalan melalui era emas ini). "Alam tidak dirancang untuk membuat kita bahagia," kata astronom Donald Brownlee. Dibandingkan rentang hidup alam semesta, perkembangan kehidupan berlangsung dalam waktu yang singkat saja.

Tahap 3: Era Degenerasi

Di tahap 3 (antara 15 sampai 30), energi bintang-bintang di alam semesta akhirnya akan habis. Proses pembakaran hidrogen dan kemudian helium yang kelihatannya abadi pada akhirnya akan berhenti, menyisakan sebongkah materi nuklir mati dalam bentuk bintang kerdil, bintang neutron, dan *black hole*. Bintang-bintang di langit berhenti bersinar; alam semesta lambat-laun diliputi kegelapan.

Temperatur akan turun dramatis di tahap 3, sebab bintang-bintang kehilangan mesin nuklir mereka. Planet yang mengitari bintang mati akan membeku. Asumsikan Bumi masih utuh, apa-apa yang tersisa di permukaannya akan menjadi lembaran es beku, memaksa bentuk-bentuk makhluk berakal untuk mencari rumah baru.

Sementara bintang-bintang raksasa bertahan selama beberapa juta

tahun dan bintang-bintang pembakar hidrogen seperti Matahari kita bertahan selama miliaran tahun, bintang kerdil merah akan betul-betul terbakar selama trilunan tahun. Inilah alasannya mengapa upaya untuk merelokasi orbit Bumi ke sekeliling bintang kerdil merah adalah masuk akal secara teori. Tetangga bintang terdekat Bumi, Proxima Centauri, adalah bintang kerdil merah yang berjarak 4,3 tahun-cahaya saja dari Bumi. Tetangga terdekat kita itu berbobot 15% saja dari massa Matahari dan 400 kali lipat lebih redup daripada Matahari, sehingga suatu planet yang mengorbitnya harus sangat dekat untuk memanfaatkan cahayanya yang redup. Bumi harus mengorbit bintang ini 20 kali lebih dekat daripada terhadap Matahari, guna menerima cahaya matahari dalam jumlah yang sama. Tapi sekali berada di orbit sekeliling bintang kerdil merah, sebuah planet akan mendapat energi untuk bertahan selama triliunan tahun.

Akhirnya, satu-satunya bintang yang akan terus membakar bahan bakar nuklir mereka adalah bintang kerdil merah. Namun, pada saatnya mereka akan berubah gelap. Dalam seratus triliun tahun, bintang kerdil merah sisa akhirnya akan mati.

Tahap 4: Era Black Hole

Di tahap 4 (antara 40 sampai 100), satu-satunya sumber energi adalah penguapan energi yang lambat dari *black hole*. Sebagaimana ditunjukkan oleh Jacob Bekenstein dan Stephen Hawking, *black hole* tidaklah betul-betul gelap; mereka sebetulnya memancarkan sejumlah energi redup, disebut penguapan. (Praktisnya, penguapan *black hole*

ini terlalu kecil untuk diobservasi secara eksperimen, tapi pada skala waktu yang panjang, penguapan akhirnya menentukan takdir sebuah *black hole*.)

Black hole yang menguap bisa memiliki beraneka ragam umur hidup. Mini-*black hole* seukuran proton dapat memancarkan 10 miliar watt daya selama masa hidup tata surya. *Black hole* yang berbobot setara dengan Matahari akan menguap dalam 10^{66} tahun. *Black hole* yang berbobot setara dengan gugus galaksi akan menguap dalam 10^{117} tahun. Namun, sewaktu *black hole* mendekati akhir hidupnya, setelah secara lambat memancarkan radiasi, ia meledak tiba-tiba. Mungkin makhluk berakal, seperti para gelandangan yang berhimpitan di sebelah bara api yang meredup, akan berkerumun di sekeliling panas redup yang dipancarkan dari *black hole* menguap guna mengekstrak sedikit panas darinya, sampai akhirnya menguap.

Tahap 5: Era Gelap

Di tahap 5 (melebihi 101), kita memasuki era gelap alam semesta, ketika semua sumber panas akhirnya habis. Di tahap ini, alam semesta hanyut secara perlahan menuju kematian panas penghabisan, sebab temperatur mendekati nol absolut. Pada titik ini, atom-atom sendiri hampir berhenti. Bahkan mungkin proton sendiri akan meluruh, menyisakan lautan foton yang mengeluyur dan gumpalan tipis partikel-partikel yang berinteraksi secara lemah (neutrino, elektron, dan antipartikel mereka, positron). Alam semesta mungkin akan terdiri dari "atom" tipe baru yang disebut positronium, yang tersusun

dari elektron dan positron yang saling mengitari.

Beberapa fisikawan berspekulasi bahwa "atom" yang tersusun dari elektron dan antielektron ini mungkin sanggup membentuk blok penyusun baru untuk makhluk berakal di era gelap ini. Namun, kesulitan yang dihadapi ide ini sungguh hebat. Atom positronium berukuran sebanding dengan atom biasa. Tapi atom positronium di era gelap akan berdiameter sekitar 10^{12} megaparsec, jutaan kali lebih besar dari ukuran alam semesta yang bisa diamati hari ini. Jadi di era gelap ini, saat "atom-atom" ini terbentuk, mereka akan seukuran keseluruhan alam semesta. Karena alam semesta selama era gelap akan mengembang sampai jarak amat besar, ia akan dengan mudah menampung atom-atom positronium raksasa ini. Tapi karena atom positronium ini begitu besar, artinya "reaksi kimiawi" yang melibatkan "atom" ini akan berskala waktu kolosal yang sama sekali berbeda dari yang kita kenal.

Sebagaimana ditulis kosmolog Tony Rothman, "Dan dengan demikian, akhirnya, setelah 10^{117} tahun, kosmos akan terdiri dari beberapa elektron dan positron yang terkunci di orbit berat mereka, neutrino dan foton yang tersisa dari peluruhan baryon, dan proton yang berkeliaran yang tersisa dari penghancuran positronium dan *black hole*. Sebab ini juga tertulis di Buku Takdir."

Bisakah Makhluk Berakal Bertahan?

Berdasarkan kondisi-kondisi membekukan yang dijumpai di akhir *big freeze*, para ilmuwan memperdebatkan apakah bentuk makhluk

berakal dapat bertahan hidup. Semula, terasa tak ada artinya mendiskusikan keberlangsungan makhluk berakal di tahap 5, ketika temperatur terjun mendekati nol absolut. Namun, sungguh-sungguh terdapat perdebatan hangat di kalangan fisikawan tentang apakah makhluk berakal dapat bertahan.

Perdebatan itu berpusat pada dua pertanyaan kunci. Yang pertama adalah: bisakah makhluk berakal mengoperasikan mesin mereka ketika temperatur mendekati nol absolut? Menurut hukum termodinamika, karena energi mengalir dari temperatur tinggi ke temperatur rendah, pergerakan energi ini bisa dipakai untuk melakukan kerja mekanis yang berguna. Contoh, kerja mekanis dapat diperoleh melalui mesin panas yang menghubungkan dua kawasan bertemperatur berbeda. Semakin besar selisih temperaturnya, semakin tinggi efisiensi mesin. Ini merupakan basis mesin yang mentenagai Revolusi Industri, seperti mesin uap dan lokomotif. Semula, terasa mustahil untuk memperoleh kerja dari mesin panas di tahap 5, karena seluruh temperatur akan sama.

Pertanyaan kedua adalah: bisakah bentuk makhluk berakal mengirim dan menerima informasi? Menurut teori informasi, satuan terkecil yang dapat dikirimkan dan diterima berbanding dengan temperatur. Sewaktu temperatur jatuh mendekati nol absolut, kemampuan untuk memproses informasi juga rusak parah. Bit-bit informasi yang dapat ditransmisikan selagi alam semesta mendingin akan semakin kecil.

Fisikawan Freeman Dyson dan yang lainnya telah menganalisis

ulang fisika makhluk berakal yang menghadapi alam semesta sekarat. Mungkinkah ditemukan cara cerdik, tanya mereka, bagi makhluk berakal untuk bertahan dari temperatur yang jatuh mendekati nol absolut?

Sewaktu temperatur mulai jatuh di sepanjang alam semesta, pada awalnya makhluk-makhluk mungkin mencoba menurunkan temperatur tubuh mereka dengan memanfaatkan rekayasa genetik. Dengan cara ini, mereka bisa jauh lebih efisien dalam menggunakan persediaan energi yang menipis. Tapi akhirnya, temperatur tubuh akan mencapai titik beku air. Pada waktu ini, makhluk berakal mungkin harus membuang tubuh lemah mereka yang terdiri dari daging dan darah dan lalu mengambil tubuh robotik. Tubuh mekanis dapat bertahan terhadap dingin secara jauh lebih baik dibanding daging. Tapi mesin juga harus mematuhi hukum teori informasi dan termodinamika, membuat kehidupan menjadi amat sulit, bahkan untuk robot sekalipun.

Sekalipun makhluk-makhluk berakal membuang tubuh robotik mereka dan mengubah diri mereka menjadi kesadaran semata, masih terdapat persoalan pemrosesan informasi. Selagi temperatur terus jatuh, satu-satunya cara untuk bertahan adalah "berpikir" lebih lambat. Dyson menyimpulkan bahwa bentuk makhluk cerdik akan masih sanggup berpikir selama jangka waktu indefinitif (tak terbatas) dengan memanjangkan waktu yang diperlukan untuk pemrosesan informasi dan dengan berhibernasi untuk menghemat energi. Walaupun waktu fisik yang dibutuhkan untuk berpikir dan

memproses informasi terbentang lebih dari miliaran tahun, "waktu subjektif", yang dirasakan oleh makhluk berakal itu sendiri, akan tetap sama. Mereka takkan pernah melihat adanya selisih. Mereka akan masih sanggup berpikir mendalam tapi pada skala waktu yang jauh lebih lambat. Dyson menyimpulkan, dengan nada aneh tapi optimistik, bahwa dengan cara ini, makhluk berakal akan sanggup memproses informasi dan "berpikir" dalam jangka waktu indefinitif. Pemrosesan pikiran tunggal mungkin memakan waktu triliunan tahun, tapi berkenaan dengan "waktu subjektif", pemberpikiran akan berjalan normal.

Tapi jika makhluk berakal berpikir lebih lambat, barangkali mereka akan menyaksikan transisi quantum kosmik yang terjadi di alam semesta. Normalnya, transisi kosmik semacam itu, seperti pembentukan bayi alam semesta atau transisi menjadi alam semesta quantum lain, berlangsung lebih dari triliunan tahun dan karenanya murni teoritis. Namun, di tahap 5, trilunan tahun dalam "waktu subjektif" akan termampatkan dan mungkin terlihat hanya beberapa detik bagi makhluk ini; mereka akan berpikir begitu lambat sehingga mereka melihat peristiwa-peristiwa quantum aneh terjadi sepanjang waktu. Mereka akan terus-menerus melihat gelembung alam semesta muncul entah dari mana atau lompatan quantum menuju alam semesta lain.

Tapi mengingat adanya penemuan mutakhir bahwa alam semesta berakselerasi, fisikawan telah memeriksa ulang penelitian Dyson dan menyalakan perdebatan baru, mencapai kesimpulan berlawanan—

makhluk berakal pasti akan musnah di alam semesta berakselerasi. Fisikawan Lawrence Krauss dan Glenn Starkman menyimpulkan, "Miliaran tahun silam alam semesta terlampau panas untuk eksisnya kehidupan. Tak terhitung masa dari sekarang, ia akan menjadi begitu dingin dan hampa sehingga kehidupan, tak peduli secerdik apa pun, akan musnah."

Dalam penelitian awalnya, Dyson berasumsi bahwa radiasi gelombang mikro 2,7 derajat di alam semesta akan terus jatuh selama jangka waktu indefinitif, sehingga makhluk berakal akan mengekstrak kerja berguna dari selisih temperatur amat kecil ini. Namun, Krauss dan Starkman menjelaskan bahwa bila alam semesta mempunyai konstanta kosmologis, maka temperatur takkan jatuh selamanya, sebagaimana diasumsikan Dyson, melainkan pada akhirnya akan menyentuh batas bawah, temperatur Gibbons-Hawking (sekitar 10^{-29} derajat). Sekali temperatur ini tercapai, temperatur di sepanjang alam semesta akan sama, dan karenanya makhluk berakal takkan mampu mengekstrak energi berguna dengan memanfaatkan perbedaan temperatur. Sekali seluruh alam semesta mencapai temperatur seragam, semua pemrosesan informasi akan berhenti.

(Pada 1980-an ditemukan bahwa sistem quantum tertentu, seperti gerak Browning pada fluid, dapat dipergunakan sebagai basis komputer, tak peduli seberapa dingin temperatur di luar. Jadi meski temperatur terjun sekalipun, komputer-komputer ini masih bisa berkomputasi dengan menggunakan semakin sedikit energi. Ini kabar bagus untuk Dyson. Tapi ada kesulitan tersembunyi. Sistem harus

memenuhi dua kondisi: ia harus tetap ekuilibrium dengan lingkungannya, dan ia tak boleh membuang informasi. Tapi bila alam semesta mengembang, keekuilibriuman adalah mustahil, sebab panjang gelombang radiasi menipis dan meregang. Alam semesta yang berakselerasi berubah terlalu cepat bagi sistem untuk mencapai ekuilibrium. Dan kedua, persyaratan bahwa ia tak boleh membuang informasi maksudnya adalah makhluk berakal tak boleh lupa. Akhirnya, makhluk berakal, lantaran tak mampu membuang ingatan lama, mungkin mendapati dirinya menghidupkan kembali ingatan lama berulang-ulang. "Keabadian akan menjadi penjara, ketimbang menjadi horison kreatifitas yang menjauh tanpa ujung. Itu mungkin *nirwana*[19], tapi apakah akan hidup?" tanya Krauss dan Starkman.)

Ringkasnya, kita menyimak bahwa bila konstanta kosmologis mendekati nol, makhluk berakal bisa "berpikir" selama jangka waktu indefinitif dengan berhibernasi dan berpikir lebih lambat selagi alam semesta mendingin. Tapi di alam semesta berakselerasi seperti punya kita, ini mustahil. Semua makhluk berakal pasti musnah, menurut hukum fisika.

Oleh sebab itu, dari sudut perspektif kosmik ini kita melihat bahwa kondisi untuk kehidupan yang kita kenal tak lain merupakan episode singkat dalam anyaman yang jauh lebih besar. Hanya ada jendela kecil di mana temperaturnya "tepat" untuk menopang kehidupan, tidak terlalu panas ataupun terlalu dingin.

---

[19] Kebahagiaan sempurna yang diperoleh melalui pemusnahan individualitas—penj.

Meninggalkan Alam Semesta

Kematian bisa didefinisikan sebagai penghentian final semua pemrosesan informasi. Setiap spesies berakal di alam semesta, saat mulai memahami hukum fundamental fisika, akan terpaksa berhadapan dengan kematian akhir alam semesta dan seluruh makhluk berakal di dalamnya.

Untungnya, ada banyak waktu untuk mengumpulkan energi untuk perjalanan seperti itu, dan terdapat alternatif-alternatif, sebagaimana akan kita simak di bab berikutnya. Pertanyaan yang akan kita gali adalah: apakah hukum fisika memperkenankan pelarian kita ke alam semesta paralel?

Bab 11
Lari Dari Alam Semesta

Teknologi yang cukup maju tidak bisa dibedakan dari sulap.

—Arthur C. Clarke

Dalam novel *Eon*, pengarang sains fiksi Greg Bear menulis sebuah kisah mengerikan tentang pelarian dari dunia yang hancur menuju alam semesta paralel. Sebuah asteorid raksasa dari luar angkasa mendekati planet Bumi, menimbulkan kepanikan dan histeria masal. Namun, bukannya menghantam Bumi, asteorid itu anehnya menetap di orbit sekeliling planet Bumi. Tim-tim ilmuwan dikirim ke luar angkasa untuk menyelidiki. Namun, bukannya menemukan permukaan terlantar yang tak berkehidupan, mereka mendapati bahwa asteorid itu sebetulnya berlubang; ia merupakan kapal antariksa besar yang ditinggalkan oleh ras berteknologi superior. Di dalam kapal antariksa yang ditinggalkan itu, sang pahlawan dalam novel, fisikawan teoritis bernama Patricia Vasquez, menemukan tujuh kamar luas, pintu masuk menuju dunia berbeda-beda, dengan danau, hutan, pepohonan, bahkan kota secara keseluruhan. Selanjutnya, dia menemukan perpustakaan besar yang berisi sejarah lengkap bangsa aneh ini.

Mengambil sebuah buku tua, dia mendapati bahwa itu adalah *Tom*

Sawyer, karangan Mark Twain, tapi dicetak ulang pada tahun 2110. Dia menyadari bahwa asteroid tersebut bukan berasal dari peradaban alien sama sekali, melainkan dari Bumi sendiri, 1.300 tahun di masa depan. Dia menyadari kebenaran yang memuakkan: catatan-catatan tua ini menceritakan perang nuklir kuno yang meletus jauh di masa lampau, menewaskan miliaran orang, melepaskan musim dingin nuklir yang membunuh miliaran lainnya. Saat dia meneliti waktu peperangan nuklir ini, dia terguncang mendapati bahwa itu terjadi hanya dua minggu lagi di masa depan! Dia tidak berdaya untuk menghentikan peperangan tak terhindarkan yang akan segera menghabiskan seluruh planet ini, menewaskan orang-orang yang dia sayangi.

Yang mengerikan, dia menemukan sejarah pribadinya sendiri dalam catatan tua ini, dan mendapati bahwa penelitian masa depannya dalam bidang ruang-waktu akan membantu meletakkan dasar untuk terowongan luas bernama Way pada asteroid tersebut, yang akan mengizinkan manusia meninggalkan asteorid itu dan memasuki alam semesta lain. Teori-teorinya telah membuktikan bahwa terdapat alam semesta quantum dalam jumlah tak terhingga, melambangkan semua kemungkinan realitas. Selain itu, teori-teorinya memungkinkan pembangunan gerbang yang terletak di sepanjang Way untuk memasuki alam semesta-alam semesta ini, masing-masing dengan sejarah berlainan. Akhirnya, dia memasuki terowongan itu, menuruni Way, dan bertemu orang-orang yang melarikan diri dengan asteorid, keturunannya.

Dunia yang aneh. Berabad-abad sebelumnya, orang-orang itu meninggalkan bentuk manusia dan kemudian bisa mengambil beragam bentuk dan tubuh. Bahkan orang-orang yang sudah lama mati telah menyimpan ingatan dan kepribadian mereka dalam bank komputer dan bisa dihidupkan kembali. Mereka bisa dihidupkan kembali dan diunduh beberapa kali ke dalam tubuh baru. *Implant* yang ditempatkan dalam tubuh mereka memberi mereka akses informasi yang hampir tak terbatas. Walaupun orang-orang ini bisa memiliki hampir segala hal yang mereka inginkan, sang pahlawan kita merasa sengsara dan kesepian di surga teknologi ini. Dia rindu keluarganya, kekasihnya, Bumi-*nya*, semua yang hancur dalam perang nuklir. Akhirnya dia diberi izin untuk memindai berlipat-lipat alam semesta yang terletak di sepanjang Way untuk menemukan Bumi paralel di mana perang nuklir terhindarkan dan orang-orang tersayangnya masih hidup. Dia akhirnya menemukan satu dan lompat ke dalamnya. (Sialnya, dia membuat galat matematis kecil; dia memasuki alam semesta di mana kekaisaran Mesir tak pernah jatuh. Dia menghabiskan sisa hari-harinya dengan berusaha meninggalkan Bumi paralel ini untuk menemukan rumah sejatinya.)

Walaupun gerbang dimensi yang dibahas dalam *Eon* adalah murni fiksi, itu menimbulkan pertanyaan yang berkenaan dengan kita: bisakah seseorang menemukan tempat berlindung di alam semesta paralel bilamana kondisi di alam semesta kita menjadi tak dapat ditolerir?

Kehancuran akhir alam semesta kita menjadi kabut elektron,

neutrino, dan foton tak bernyawa sepertinya mengindikasikan ajal seluruh makhluk berakal. Pada skala kosmik, kita melihat betapa rapuh dan fana kehidupan itu. Era di mana kehidupan mampu tumbuh subur terkonsentrasi di pita amat tipis, periode singkat dalam kehidupan bintang-bintang yang menerangi langit malam. Rasanya mustahil kehidupan terus berlanjut sementara alam semesta menua dan mendingin. Hukum fisika dan termodinamika sungguh gamblang: jika perluasan alam semesta terus berakselerasi dengan mode tak terkendali, makhluk berakal yang kita kenal pada akhirnya tidak dapat bertahan. Tapi sementara temperatur alam semesta terus jatuh selama bermasa-masa, mampukah peradaban maju mencoba menyelamatkan diri? Dengan menyusun seluruh teknologinya, dan teknologi peradaban lain yang mungkin eksis di alam semesta, bisakah ia lari dari keniscayaan *big freeze*?

Karena laju perkembangan tahap-tahap alam semesta diukur dalam miliaran sampai triliunan tahun, terdapat waktu yang berlimpah bagi peradaban cerdik dan tekun untuk berupaya memenuhi tantangan ini. Walaupun merupakan spekulasi belaka untuk membayangkan teknologi macam apa yang mungkin ditemukan oleh peradaban maju untuk memperpanjang eksistensinya, seseorang bisa menggunakan hukum fisika yang dikenal untuk membahas opsi luas yang mungkin tersedia bagi mereka miliaran tahun dari sekarang. Fisika tidak dapat memberitahu kita rencana spesifik apa yang mungkin diadopsi oleh sebuah peradaban maju, tapi ia dapat memberitahu kita rentang parameter untuk pelarian semacam itu.

Bagi seorang insinyur, permasalahan utama dalam meninggalkan alam semesta adalah apakah kita punya cukup sumber daya untuk membangun sebuah mesin yang bisa melakukan tugas sesulit itu. Tapi bagi fisikawan, permasalahan utamanya berbeda: apakah hukum fisika memperkenankan eksistensi mesin-mesin ini. Fisikawan menginginkan "bukti prinsip"—kita ingin menunjukkan bahwa, jika Anda mempunyai teknologi yang cukup maju, pelarian ke alam semesta lain akan mungkin dilakukan menurut hukum fisika. Persoalan apakah kita mempunyai cukup sumber daya merupakan detil kurang praktis yang harus diserahkan pada peradaban-peradaban miliaran tahun di masa depan yang menghadapi *big freeze*.

Menurut Astronomer Royal, Sir Martin Rees, "*Wormhole*, dimensi tambahan, dan komputer quantum membuka skenario-skenario spekulatif yang dapat mengubah seluruh alam semesta kita menjadi 'kosmos hidup'."

Peradaban Tipe I, II, dan III

Untuk memahami teknologi peradaban yang ribuan sampai jutaan tahun melampaui peradaban kita, terkadang fisikawan mengklasifikasikan peradaban berdasarkan konsumsi energi mereka dan hukum termodinamika. Saat memindai angkasa untuk mencari tanda-tanda makhluk berakal, fisikawan tidak mencari sosok hijau kecil melainkan peradaban dengan output energi peradaban tipe I, II, dan III. Penggolongan itu diperkenalkan oleh fisikawan Rusia, Nikolai Kardashev, pada tahun 1960-an untuk mengklasifikasikan sinyal radio

dari peradaban yang mungkin eksis di luar angkasa. Tiap-tiap tipe peradaban memancarkan bentuk radiasi khas yang dapat diukur dan dikatalogkan. (Bahkan peradaban maju yang mencoba menyembunyikan keberadaannya dapat dideteksi oleh instrumen kita. Berdasarkan hukum termodinamika kedua, suatu peradaban maju akan menghasilkan entropi dalam bentuk panas buangan yang tak pelak lagi akan lepas ke luar angkasa. Sekalipun mereka mencoba menutupi keberadaan mereka, mustahil untuk menyembunyikan pijaran redup yang dihasilkan oleh entropi mereka.)

Peradaban tipe I adalah peradaban yang telah memanfaatkan bentuk energi planeter. Konsumsi energi mereka bisa diukur secara akurat: menurut definisi, mereka sanggup memanfaatkan seluruh jumlah energi surya yang mengenai planet mereka, atau 10^{16} watt. Dengan energi planeter ini, mereka dapat mengendalikan atau memodifikasi cuaca, mengubah arah angin ribut, atau membangun kota di lautan. Peradaban semacam itu sungguh-sungguh merupakan penguasa planet mereka dan telah menciptakan peradaban planeter.

Peradaban tipe II telah kehabisan tenaga planet dan telah memanfaatkan tenaga bintang, atau kira-kira 10^{26} watt. Mereka sanggup mengkonsumsi seluruh output energi dari bintang mereka dan mungkin mengendalikan *flare*[20] surya dan menyalakan bintang lain.

Peradaban tipe III telah kehabisan tenaga tata surya dan telah mengkoloni/mendiami seporsi besar galaksi induknya. Peradaban semacam itu sanggup memanfaatkan energi dari 10 miliar bintang,

[20] Nyala api yang melebar—penj.

atau kira-kira 10^{36} watt.

Tiap-tiap tipe peradaban berbeda dari tipe lebih rendah sebesar faktor 10 miliar. Oleh sebab itu, peradaban tipe III, memanfaatkan tenaga miliaran sistem bintang, bisa mempergunakan 10 miliar kali lipat output energi peradaban tipe II, yang mana memanfaatkan 10 miliar kali lipat output peradaban tipe I. Walaupun gap yang memisahkan peradaban-peradaban ini mungkin terasa amat besar, mengestimasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai peradaban tipe III bisa dilakukan. Asumsikan sebuah peradaban tumbuh dengan laju sedang 2% sampai 3% dalam hal output energinya per tahun. (Asumsi ini masuk akal, sebab pertumbuhan ekonomi, yang lumayan dapat dikalkulasi, terkait langsung dengan konsumsi energi. Semakin besar perekonomiannya, semakin besar permintaan energinya. Karena pertumbuhan produk domestik bruto, atau PDB, banyak negara berkisar antara 1% sampai 2% per tahun, kita bisa menduga konsumsi energinya tumbuh dengan laju yang kurang-lebih sama.)

Pada laju sedang ini, kita bisa mengestimasi bahwa peradaban mutakhir kita kurang-lebih 100 sampai 200 tahun lagi untuk mencapai status tipe I. Kita memerlukan kira-kira 1.000 sampai 5.000 tahun untuk mencapai status tipe II, dan barangkali 100.000 sampai 1.000.000 tahun untuk mencapai status tipe III. Pada skala seperti itu, peradaban kita hari ini boleh diklasifikasikan sebagai peradaban tipe 0, sebab kita memperoleh energi kita dari tanaman mati (minyak dan batu bara). Bahkan pengendalian angin ribut, yang dapat melepaskan tenaga ratusan senjata nuklir, tidak terjangkau oleh teknologi kita.

Untuk menggambarkan peradaban kita hari ini, astronom Carl Sagan menganjurkan untuk membuat gradasi lebih halus antara tipe-tipe peradaban. Peradaban tipe I, II, dan III, telah kita simak, menghasilkan output total energi kira-kira 10^{16}, 10^{26}, dan 10^{36} watt. Sagan memperkenalkan peradaban tipe I.1, contohnya, yang menghasilkan 10^{17} watt daya, peradaban tipe I.2 yang menghasilkan 10^{18} watt daya, dan seterusnya. Dengan membagi tiap-tiap tipe I menjadi sepuluh subtipe kecil, kita dapat mulai mengklasifikasikan peradaban kita sendiri. Pada skala ini, peradaban mutakhir kita lebih seperti peradaban tipe 0.7—jarak yang mencolok untuk menjadi betul-betul [peradaban] planeter. (Peradaban tipe 0.7 masih seribu kali lebih kecil daripada tipe I, dalam hal produksi energi.)

Walaupun peradaban kita masih sungguh primitif, kita sudah melihat berlangsungnya tanda-tanda transisi. Ketika saya menatap tajuk utama suratkabar, saya tak henti-hentinya melihat tandamata evolusi bersejarah ini. Nyatanya, saya merasa terhormat masih hidup untuk menyaksikan ini:

- Internet merupakan sistem telepon tipe I yang sedang muncul. Ia mempunyai kapabilitas menjadi basis jaringan komunikasi planeter universal.
- Perekonomian masyarakat tipe I tak hanya akan didominasi oleh negara-negara tapi juga oleh blok-blok perdagangan besar mirip Uni Eropa, yang dibentuk lantaran adanya persaingan dari NAFTA (negara-negara Amerika Utara).
- Bahasa masyarakat tipe I kita barangkali adalah bahasa Inggris,

yang sudah menjadi bahasa dominan kedua di Bumi. Di banyak negara dunia ketiga hari ini, golongan atas dan lulusan universitas cenderung berbicara bahasa Inggris dan bahasa setempat. Seluruh populasi peradaban tipe I mungkin berdwi-bahasa dengan cara ini, berbicara bahasa setempat dan bahasa planet.

- Negara-negara, walaupun mereka mungkin akan eksis dalam suatu bentuk di abad-abad mendatang, akan menjadi kurang penting, sementara hambatan perdagangan runtuh dan dunia menjadi lebih saling bergantung secara ekonomi. (Negara-negara modern, sebagian, mulanya didirikan oleh para kapitalis dan orang-orang yang menginginkan keseragaman mata uang, perbatasan, pajak, dan peraturan untuk menjalankan bisnis. Karena bisnis sendiri menjadi semakin internasional, perbatasan nasional pasti semakin kurang relevan.) Tak ada satu negara pun yang cukup berkuasa untuk menghentikan gerakan menuju peradaban tipe I ini.
- Perang mungkin akan selalu bersama kita, tapi sifat perang akan berubah seiring kemunculan golongan menengah di planet ini yang lebih tertarik pada turisme dan pengumpulan kekayaan dan sumber daya ketimbang menundukkan orang lain dan mengendalikan pasar atau kawasan geografis.
- Polusi akan semakin ditangani pada skala planet. Gas rumah kaca, hujan asam, pembakaran hutan tropis, dan semacamnya tidak menghormati perbatasan nasional, dan akan ada tekanan

dari negara tetangga kepada pihak bersalah untuk memperbaiki tingkah laku. Permasalahan lingkungan global akan membantu mempercepat solusi global.

- Karena sumber daya (seperti panen ikan, panen biji-bijian, dan sumber daya air) lambat-laun menipis akibat pengolahan dan konsumsi berlebihan, akan ada peningkatan tekanan untuk mengelola sumber daya kita pada skala global atau, kalau tidak, kita akan menghadapi kelaparan dan keambrukan.
- Informasi akan hampir bebas, mendorong masyarakat untuk jauh lebih demokratis, memperkenankan orang-orang yang terpinggirkan untuk memperoleh suara baru, dan memberikan tekanan terhadap kediktatoran.

Kekuatan-kekuatan ini berada di luar kendali individu atau negara mana pun. Internet tidak dapat dilarang. Nyatanya, tindakan semacam itu akan lebih menggelikan daripada menakutkan, sebab Internet merupakan jalan menuju kesejahteraan ekonomi, sains, budaya, dan juga hiburan.

Tapi transisi dari tipe 0 ke tipe I juga sangat membahayakan, sebab kita masih memperlihatkan kebiadaban yang melambangkan kemunculan kita dari hutan. Sedikit-banyak, kemajuan peradaban kita adalah perpacuan dengan waktu. Di satu sisi, gerakan menuju peradaban planeter tipe I mungkin menjanjikan kita sebuah era perdamaian dan kesejahteraan tiada banding. Di sisi lain, kekuatan entropi (efek rumah kaca, polusi, perang nuklir, fundamentalisme, penyakit) masih mengoyak kita. Sir Martin Rees melihat ancaman-

ancaman ini, serta hal-hal yang diakibatkan oleh terorisme, kuman rekayasa biologi, dan mimpi buruk teknologi lainnya, sebagai beberapa tantangan terbesar yang dihadapi manusia. Sungguh melegakan, Rees memberi kita peluang 50:50 saja untuk berhasil menegosiasikan tantangan ini.

Ini mungkin merupakan salah satu alasan mengapa kita tidak melihat peradaban ekstraterestrial di ruang angkasa. Jika mereka memang eksis, barangkali mereka begitu maju sehingga hanya memiliki sedikit minat terhadap masyarakat primitif tipe 0.7 kita. Kemungkinan lain, mereka disibukkan oleh perang atau binasa oleh polusi mereka sendiri, saat berusaha mencapai status tipe I. (Dalam hal ini, generasi kita yang sekarang hidup mungkin merupakan salah satu generasi terpenting yang pernah berjalan di muka Bumi; generasi ini mungkin sangat menentukan apakah kita berhasil dengan aman menjalani transisi menuju peradaban tipe I.)

Tapi sebagaimana pernah dikatakan oleh Friedrich Nietzsche, apa-apa yang tidak membunuh kita akan membuat kita lebih kuat. Transisi menyakitkan kita dari tipe 0 ke tipe I tentu saja akan menjadi percobaan membahayakan, dengan sejumlah ancaman yang mengerikan. Bila kita bisa keluar dari tantangan ini secara sukses, kita akan lebih kuat, selayaknya penempaan baja leleh untuk mengeraskannya.

Peradaban Tipe I

Ketika sebuah peradaban mencapai status tipe I, ia tidak mungkin segera menjangkau bintang-bintang; ia lebih mungkin untuk tetap di

planet induk selama berabad-abad, cukup lama untuk menyelesaikan nafsu nasionalistis, fundamentalis, rasial, dan sektariannya di masa lalu. Para penulis sains fiksi seringkali meremehkan kesulitan perjalanan antariksa dan kolonisasi antariksa. Hari ini, usaha untuk menaruh sesuatu ke orbit dekat Bumi berbiaya $10.000 sampai $40.000. (Bayangkan John Glenn yang terbuat dari emas padat, maka Anda dapat mulai menilai biaya perjalanan antariksa yang tinggi). Setiap misi pesawat antariksa berbiaya di atas $800 juta (jika kita mengambil biaya total untuk program pesawat antariksa dan membagi dengan jumlah misi). Kemungkinan besar biaya perjalanan antariksa akan turun, tapi hanya sebesar faktor 10 dalam beberapa dekade ke depan, dengan kedatangan *reusable launch vehicle* (RLV) yang dapat digunakan kembali segera setelah sebuah misi selesai. Melewati abad 21, perjalanan antariksa akan tetap mahal kecuali bagi individu dan negara kaya.

(Ada satu pengecualian untuk ini: pengembangan "elevator antariksa". Kemajuan mutakhir dalam nanoteknologi memungkinkan produksi benang yang terbuat dari nanotube karbon super-kuat dan super-ringan. Secara prinsip, mungkin saja benang dari atom karbon ini bisa terbukti cukup kuat untuk menghubungkan Bumi dengan satelit geosinkron yang mengorbit lebih dari 20.000 mil di atas Bumi. Seperti Jack dan Beanstalk, seseorang mungkin bisa mendaki nanotube karbon ini untuk mencapai angkasa luar dengan biaya lebih sedikit dari biaya biasa. Secara historis, ilmuwan antariksa mengabaikan elevator antariksa karena ketegangan pada benang akan cukup

memutus fiber. Namun, teknologi nanotube karbon mungkin mengubah ini. NASA sedang mendanai studi pendahuluan mengenai teknologi ini, dan situasinya akan dianalisis secara teliti selama bertahun-tahun. Tapi seandainya teknologi semacam itu terbukti mungkin dilakukan, elevator antariksa paling banter hanya bisa membawa kita ke orbit sekeliling Bumi, tidak ke planet lain.)

Impian tentang koloni antariksa harus diperlembut dengan fakta bahwa biaya misi berawak ke Bulan dan planet-planet adalah berkali-kali lipat dari biaya misi dekat Bumi. Tak seperti pelayaran mengelilingi Bumi yang dilakukan Columbus dan penjelajah Spanyol awal berabad-abad silam, di mana biaya sebuah kapal hanya beberapa persen dari produk domestik bruto Spanyol dan di mana potensi peraihan ekonomisnya sangat besar, pendirian koloni di Bulan dan Mars akan membangkrutkan kebanyakan negara, seraya hampir tidak memberikan manfaat ekonomis langsung. Misi berawak sederhana ke Mars bisa berbiaya antara $100 miliar sampai $500 miliar, dengan sedikit hasil saja yang diperoleh secara finansial.

Demikian pula, seseorang harus mempertimbangkan bahaya terhadap penumpang manusia. Setelah setengah abad pengalaman dengan roket berbahan bakar cair, peluang kegagalan berbahaya yang menyangkut misi roket adalah sekitar 1 dalam 70. (Nyatanya, dua kerugian tragis pesawat antariksa masuk dalam rasio ini.) Perjalanan antariksa, kita sering lupakan, berbeda dari turisme. Dengan begitu banyak bahan bakar yang mudah menguap dan begitu banyak ancaman terhadap nyawa manusia, perjalanan antariksa akan terus

menjadi usulan beresiko selama berdekade-dekade mendatang.

Namun, pada skala beberapa abad, situasinya mungkin berangsur-angsur berubah. Seiring dengan penurunan lambat biaya perjalanan antariksa secara terus-menerus, beberapa koloni antariksa mungkin sedikit demi sedikit berdiam di Mars. Pada skala waktu ini, beberapa ilmuwan bahkan telah mengajukan mekanisme cerdik untuk men-*terraform*[21] Mars, seperti membelokkan komet dan membiarkannya menguap di atmosfer, sehingga menambah uap air di atmosfer. Yang lainnya menganjurkan penyuntikan gas metan ke atmosfer untuk menciptakan efek rumah kaca artifisial di planet merah itu, menaikkan temperatur dan secara bertahap melelehkan *permafrost*[22] di bawah permukaan Mars, sehingga memenuhi danau-danau dan sungai-sungainya untuk pertama kali dalam miliaran tahun. Beberapa ilmuwan mengajukan langkah yang lebih ekstrim dan berbahaya, seperti meledakkan hulu ledak nuklir bawah tanah di bawah kantong-kantong es untuk melelehkan es (yang dapat menimbulkan bahaya kesehatan bagi kolonis (penghuni koloni) antariksa di masa depan). Tapi usulan-usulan ini masih spekulatif.

Yang lebih mungkin, peradaban tipe I akan menjadikan koloni antariksa sebagai prioritas jauh di beberapa abad berikutnya. Tapi untuk misi jarak jauh antarplanet, di mana waktu tidak begitu mendesak, pengembangan mesin surya/ion dapat menawarkan bentuk propulsi (tenaga pendorong) baru di antara bintang-bintang. Mesin

21 Membentuk dataran tinggi kasar dengan albedo (reflektifitas terhadap radiasi matahari) yang relatif tinggi—penj.

22 Lapisan tanah sebelah bawah yang membeku sepanjang tahun—penj.

pendorong lambat semacam itu akan menghasilkan dorongan kecil, tapi dapat mempertahankan dorongan tersebut selama bertahun-tahun secara berturut-turut. Mesin ini mengkonsentrasikan energi surya dari matahari, memanaskan gas seperti celium, lalu mengeluarkan gas tersebut dari katup buangan, menghasilkan dorongan lembut yang bisa dipertahankan dalam jangka waktu hampir tak terbatas. Kendaraan yang ditenagai mesin semacam itu ideal untuk menciptakan "sistem jalan raya antarnegara bagian" antarplanet yang menghubungkan planet-planet.

Akhirnya, peradaban tipe I akan mengirim beberapa satelit eksperimen ke bintang-bintang dekat. Karena kecepatan roket kimiawi dibatasi oleh kecepatan maksimum gas dalam katup buangan roket, fisikawan harus menemukan bentuk propulsi yang lebih eksotis jika mereka berharap mencapai jarak ratusan tahun-cahaya. Satu rancangan potensial adalah menciptakan ramjet fusi, sebuah roket yang menyekop hidrogen dari ruang antarbintang dan memfusikannya, melepaskan energi tak terbatas dalam proses tersebut. Namun, fusi proton menjadi proton sungguh sulit dicapai di Bumi sekalipun, apalagi di luar angkasa dalam kapal bintang. Teknologi demikian paling banter hadir pada abad mendatang.

Peradaban Tipe II

Peradaban tipe II yang sanggup memanfaatkan tenaga sebuah bintang mungkin mirip dengan versi Federation of Planets dalam seri *Star Trek*, tanpa *warp drive*. Mereka mengkoloni sebagian kecil galaksi

Bima Sakti dan dapat menyalakan bintang, dan karenanya mereka memenuhi syarat untuk status tipe II yang sedang muncul.

Untuk sepenuhnya memanfaatkan output Matahari, fisikawan Freeman Dyson berspekulasi bahwa peradaban tipe II mungkin membangun bola raksasa di sekeliling Matahari untuk menyerap sinarnya. Peradaban ini mungkin, contohnya, mampu mendekonstruksi sebuah planet seukuran Yupiter dan mendistribusikan massa pada bola di sekeliling Matahari. Lantaran adanya hukum termodinamika kedua, bola tersebut akhirnya akan memanas, melepaskan radiasi inframerah khas yang dapat dilihat dari luar angkasa. Jun Jugaku dari Research Institute of Civilization di Jepang bersama koleganya telah menyelidiki angkasa sampai jarak 80 tahun-cahaya untuk berusaha menemukan peradaban lain semacam itu dan tidak menemukan bukti adanya emisi inframerah ini (walaupun galaksi kita berdiameter 100.000 tahun cahaya).

Peradaban tipe II mungkin mengkoloni beberapa planet di tata surya mereka dan bahkan memulai program untuk mengembangkan perjalanan antarbintang. Lantaran tersedianya sumber daya yang luas bagi peradaban tipe II, mereka mungkin telah mengembangkan bentuk propulsi eksotis sebagai pendorong antimateri/materi untuk kapal bintang mereka, memungkinkan perjalanan mendekati kecepatan cahaya. Secara prinsip, bentuk energi ini 100% efisien. menurut standar tipe I, ini juga memungkinkan secara eksperimen tapi sangat mahal (diperlukan pemecah atom untuk menciptakan sorot antiproton yang bisa digunakan untuk menghasilkan antiatom).

Kita hanya bisa berspekulasi tentang bagaimana masyarakat tipe II berfungsi. Bagaimanapun, membutuhkan bermilenium-milenium untuk mengatasi perselisihan terkait kekayaan, sumber daya, dan kekuasaan. Peradaban tipe II berpotensi kekal. Rasanya tak ada sesuatu yang dikenal sains yang dapat menghancurkan peradaban semacam itu, kecuali barangkali kebodohan penghuninya sendiri. Komet dan meteor dapat dibelokkan, zaman es dapat dipalingkan dengan mengubah pola cuaca, bahkan ancaman yang ditimbulkan oleh ledakan supernova dekat bisa dihindari dengan cukup meninggalkan planet induk dan mengangkut peradaban dari bahaya—atau bahkan mungkin dengan merusak mesin termonuklir bintang sekarat itu sendiri.

Peradaban Tipe III

Ketika masyarakat mencapai level peradaban tipe III, mereka mungkin mulai memikirkan energi fantastik di mana ruang dan waktu menjadi tidak stabil. Kita ingat bahwa energi Planck adalah energi di mana efek-efek quantum mendominasi, dan ruang-waktu menjadi "berbuih" gelembung kecil dan *wormhole*. Energi Planck memang di luar jangkauan kita hari ini, tapi itu hanya karena kita menilai energi dari sudut pandang peradaban tipe 0.7. Pada saat peradaban telah mencapai status tipe III, ia akan mempunyai akses (secara definisi) terhadap energi yang 10 miliar × 10 miliar (atau 10^{20}) kali lipat lebih besar daripada yang dijumpai di Bumi hari ini.

Astronom Ian Crawford dari University College di London, menulis

tentang peradaban tipe III, "Asumsikan sebuah koloni tipikal yang berluas 10 tahun-cahaya, kapal berkecepatan 10% kecepatan cahaya, dan periode 400 tahun antara pendirian koloni serta penyebarannya, front gelombang kolonisasi akan meluas dengan laju rata-rata 0,02 tahun-cahaya per tahun. Karena galaksi berdiamater 100.000 tahun-cahaya, diperlukan tak lebih dari sekitar 5 juta tahun untuk mengkoloninya secara menyeluruh. Meski merupakan waktu yang panjang menurut manusia, ini hanya 0,05% umur galaksi."

Para ilmuwan telah membuat upaya serius untuk mendeteksi emisi radio dari peradaban tipe III di galaksi kita. Teleskop radio raksasa Aricebo di Puerto Rico telah memindai banyak galaksi untuk mencari emisi radio pada frekuensi 1,42 gigahertz, mendekati garis emisi gas hidrogen. Ia tak menemukan bukti adanya emisi radio tertentu pada frekuensi tersebut dari suatu peradaban yang memancarkan daya antara 10^{18} sampai 10^{30} watt (yakni, dari tipe I.2 sampai tipe II.4). Namun, ini tidak mengesampingkan peradaban yang sedikit melampaui kita dalam hal teknologi, dari tipe 0.8 sampai tipe I.1, atau amat mendahului kita, seperti tipe II.5 dan selebihnya.

Ini juga tidak mengesampingkan bentuk-bentuk komunikasi lain. Dan sebuah peradaban maju, contohnya, dapat mengirim sinyal melalui laser ketimbang radio. Dan bila mereka menggunakan radio, mereka mungkin memakai frekuensi lain selain 1,42 gigahertz. Misalnya, mereka mungkin menyebarkan sinyal dengan banyak frekuensi dan kemudian menghimpunnya kembali di ujung penerima. Dengan cara ini, bintang yang lewat atau badai kosmik tidak akan

menginterferensi seluruh pesan. Seseorang yang mendengarkan sinyal tersebar ini mungkin hanya akan mendengar ricauan. (Surel kita sendiri dipecah menjadi banyak bagian, dengan masing-masing bagian dikirim melalui kota berlainan, dan kemudian pada akhirnya dihimpun kembali untuk PC Anda. Demikian halnya, peradaban-peradaban maju mungkin memutuskan memakai metode rumit untuk memecah sebuah sinyal dan menghimpunnya kembali di ujung lain.)

Jika peradaban tipe III eksis di alam semesta, maka salah satu perhatian mereka yang paling mendesak adalah membangun sistem komunikasi yang menghubungkan galaksi. Ini, tentu saja, tergantung pada apakah mereka bisa menguasai teknologi yang lebih cepat dari cahaya, seperti via *wormhole*. Jika kita asumsikan mereka tidak bisa, maka pertumbuhan mereka akan terhambat sekali. Fisikawan Freeman Dyson, mengutip dari karya Jean-Marc Levy-Leblond, berspekulasi bahwa masyarakat semacam itu mungkin tinggal di alam semesta "Carroll", diambil dari nama Lewis Carroll. Di masa lalu, tulis Dyson, masyarakat manusia didasarkan pada suku-suku kecil di mana ruang adalah absolut tapi waktu adalah relatif. Ini artinya komunikasi antara suku-suku yang terpencar adalah mustahil, dan kita hanya dapat menempuh jarak pendek dari tempat lahir kita dalam umur hidup manusia. Tiap-tiap suku dipisahkan oleh luasnya ruang absolut. Dengan kedatangan Revolusi Industri, kita memasuki alam semesta Newtonian, di mana ruang dan waktu menjadi absolut, dan kita mempunyai kapal dan roda yang menghubungkan suku-suku terpencar menjadi negara. Di abad 20, kita memasuki alam semesta

Einsteinian, di mana ruang dan waktu adalah relatif, dan kita mengembangkan telegraf, telepon, radio, dan TV, menghasilkan komunikasi instan. Peradaban tipe III mungkin berbalik ke alam semesta Carroll sekali lagi, dengan kantong-kantong koloni antariksa yang dipisahkan oleh jarak antarbintang yang luas, tak mampu berkomunikasi lantaran terdapat rintangan cahaya. Untuk mencegah fragmentasi alam semesta Carroll semacam itu, peradaban tipe III mungkin harus mengembangkan *wormhole* yang memperkenankan komunikasi melebihi kecepatan cahaya pada level subatom.

Peradaban Tipe IV

Suatu kali saya memberikan ceramah di London Planetarium, dan seorang anak laki-laki berumur 10 tahun menghampiri saya dan bersikeras bahwa pasti ada peradaban tipe IV. Ketika saya mengingatkannya bahwa hanya ada planet, bintang, dan galaksi, dan bahwa itu semua merupakan satu-satunya platform yang memungkinkan pertumbuhan makhluk berakal, dia mengklaim bahwa peradaban tipe IV bisa memanfaatkan tenaga *continuum* (rangkaian kesatuan—penj).

Dia benar, sadar saya. Bila peradaban tipe IV eksis, sumber energinya mungkin berasal dari luar galaksi, seperti *dark energy* yang kita lihat di sekeliling kita, yang menyusun 73% kandungan materi/energi alam semesta. Walaupun berpotensi sebagai gudang energi amat besar —jelas terbesar di alam semesta—medan antigravitasi ini tersebar di daerah hampa luas alam semesta dan karenanya sangat lemah di titik manapun di angkasa.

Nikola Tesla, sang jenius listrik dan rival Thomas Edison, menulis secara luas mengenai penuaian energi vakum. Dia percaya bahwa ruang vakum menyembunyikan gudang energi tak terkira. Jika kita bisa menyuling sumber ini, itu akan merevolusi seluruh masyarakat manusia, pikirnya. Namun, pengekstrakan energi dahsyat ini akan teramat sulit. Bayangkan mencari emas di lautan. Mungkin ada lebih banyak emas yang tersebar di lautan daripada semua emas di Fort Knox dan simpanan dunia lainnya. Namun, ongkos menggali emas di area sebesar itu sangat tinggi. Oleh sebab itu, emas yang tersimpan di lautan belum pernah dituai.

Demikian halnya, energi yang tersembunyi dalam *dark energy* melampaui seluruh kandungan energi bintang dan galaksi. Namun, itu tersebar pada jarak miliaran tahun-cahaya dan akan sulit untuk dikonsentrasikan. Tapi menurut hukum fisika, masih ada kemungkinan peradaban tipe III yang maju, setelah kehabisan tenaga bintang di galaksi, dapat mencoba menyuling energi ini untuk menjalani transisi menuju tipe IV.

Klasifikasi Informasi

Penghalusan lebih jauh pada klasifikasi peradaban bisa dibuat berdasarkan teknologi baru. Kardashev menuliskan klasifikasi awal pada 1960-an, sebelum ledakan miniaturisasi komputer, kemajuan nanoteknologi, dan kesadaran permasalahan degradasi lingkungan. Dipandang dari sudut perkembangan ini, sebuah peradaban maju mungkin berkembang dengan cara yang sedikit berbeda,

memanfaatkan penuh keuntungan revolusi informasi yang kita saksikan hari ini.

Sementara sebuah peradaban maju berkembang secara eksponensial, produksi panas buangan yang berlebihan dapat menaikkan temperatur atmosfer planet dan menimbulkan permasalahan iklim. Koloni-koloni bakteri tumbuh secara eksponensial pada *Petri dish*[23] sampai mereka kehabisan persediaan makanan dan betul-betul menghilang. Demikian pula, karena perjalanan antariksa akan tetap mahal selama berabad-abad, dan pen-*terraforming*-an planet-planet dekat, jika memungkinkan, akan menjadi tantangan ekonomi dan ilmiah, peradaban tipe I yang sedang berkembang berpotensi mati lemas akibat panas buangannya sendiri, atau ia dapat meminiaturisasi dan melangsingkan produksi informasinya.

Untuk memahami keefektifan miniaturisasi, pikirkan tentang otak manusia, yang menampung sekitar 100 miliar syaraf (sebanyak jumlah galaksi di alam semesta tampak) tapi hampir tidak menghasilkan panas. Menurut aturan, bila seorang insinyur komputer hari ini hendak merancang komputer elektronik yang mampu mengkomputasi quadiriliunan byte per detik, sementara otak bisa melakukannya tanpa susah payah, komputer tersebut mungkin berukuran beberapa balok persegi dan membutuhkan segudang air untuk mendinginkannya. Tapi otak kita bisa memikirkan ide-ide paling luhur tanpa menimbulkan keringat.

Otak mencapai ini dikarenakan oleh arsitektur molekul dan selnya.

---

23 Piring dangkal untuk pembiakan bakteri [Petri ialah nama seorang bakteriolog]—penj.

Pertama-tama, ia bukan komputer sama sekali (dalam arti mesin Turing standar, dengan pita input, pita output, dan prosesor sentral). Otak tak memiliki sistem operasi, tak memiliki Windows, tak memiliki CPU, tak memiliki chip Pentium yang lazim kita asosiasikan dengan komputer. Akan tetapi, ia merupakan jaringan syaraf amat efisien, sebuah mesin pembelajar, di mana pola ingatan dan pikiran terdistribusi di seluruh otak ketimbang terkonsentrasi di unit pemrosesan sentral. Otak bahkan tidak mengkomputasi dengan sangat cepat, sebab pesan elektris yang menyusuri syaraf bersifat kimiawi. Tapi ia mengkompensasi kelambatan ini secara lebih, lantaran dapat mengeksekusi pemrosesan paralel dan dapat mempelajari tugas baru dengan kecepatan sangat tinggi.

Untuk menaikkan efisiensi mentah komputer elektronik, para ilmuwan mencoba memakai ide baru, banyak yang diambil dari alam, untuk menciptakan komputer mini generasi berikutnya. Ilmuwan di Princeton sudah mampu mengkomputasi molekul DNA (memperlakukan DNA sebagai sepotong pita komputer yang bukan berbasis biner 0 dan 1, melainkan berbasis empat asam nuklei A, T, C, G); komputer DNA mereka memecahkan permasalahan salesman keliling untuk beberapa kota (yakni, mengkalkulasi rute terpendek yang menghubungkan kota-kota *N*.) Demikian pula, transistor molekul telah diciptakan di laboratorium, dan bahkan komputer quantum primitif pertama (yang dapat mengkomputasi atom-atom individu) telah dikonstruksi.

Berdasarkan kemajuan dalam nanoteknologi, ada kemungkinan

sebuah peradaban maju akan menemukan cara yang jauh lebih efisien untuk berkembang ketimbang menghasilkan panas buangan berlebihan yang bisa mengancam eksistensi mereka.

Tipe A Sampai Z

Sagan memperkenalkan cara lain lagi dalam menggolongkan peradaban maju berdasarkan kandungan informasi mereka, yang akan esensial bagi suatu peradaban yang bermaksud meninggalkan alam semesta. Peradaban tipe A, misalnya, adalah peradaban yang memproses 10^6 bit informasi. Ini dapat disamakan dengan peradaban primitif yang tak memiliki bahasa tulisan tapi memiliki bahasa ucapan. Untuk memahami berapa banyak informasi yang dikandung dalam peradaban tipe A, Sagan memakai contoh game 20 pertanyaan, di mana Anda harus mengidentifikasi sebuah objek misterius dengan mengajukan tidak lebih dari 20 pertanyaan yang bisa dijawab dengan ya atau tidak. Strateginya adalah mengajukan pertanyaan yang membagi dunia menjadi dua bagian besar, seperti, "Apakah ia hidup?" Setelah mengajukan 20 pertanyaan semacam itu, kita telah membagi dunia menjadi 2^{20} bagian, atau 10^6 bagian, yakni kandungan total informasi peradaban tipe A.

Sekali bahasa tulisan ditemukan, kandungan total informasi meledak pesat. Fisikawan Phillip Morrison dari MIT mengestimasi bahwa total warisan tulisan yang bertahan hidup dari zaman Yunani kuno adalah sekitar 10^9 bit, atau peradaban tipe C menurut penggolongan Sagan.

Sagan mengestimasi kandungan informasi kita di masa kini. Dengan mengestimasi jumlah buku yang tertampung di semua perpustakaan dunia (diukur dalam puluhan juta) dan jumlah halaman yang terdapat di setiap buku, dia memperoleh sekitar 10^{13} bit informasi. Bila kita mencakupkan foto, ini bisa naik sampai 10^{15} bit. Ini menempatkan kita sebagai peradaban tipe H. Berdasarkan output energi dan informasi kita yang rendah, kita dapat diklasifikasikan sebagai peradaban tipe 0.7 H.

Dia mengestimasi bahwa kontak pertama kita dengan peradaban ekstraterestrial akan menyangkut peradaban sekurangnya tipe I.5 J atau I.8 K sebab mereka telah menguasai dinamika perjalanan antarbintang. Minimal, peradaban semacam itu beberapa abad sampai beberapa milenium lebih maju dari kita. Demikian pula, peradaban galaktik tipe III bisa dilambangkan oleh kandungan informasi setiap planet dikalikan jumlah planet di galaksi yang mampu menopang kehidupan. Sagan mengestimasi bahwa peradaban tipe III demikian adalah bertipe Q. Sebuah peradaban maju yang dapat memanfaatkan kandungan informasi satu miliar galaksi, yang merepresentasikan porsi besar alam semesta tampak, akan mengkualifikasikan peradaban tersebut sebagai tipe Z, dia mengestimasi.

Ini bukanlah praktek akademis remeh-temeh. Suatu peradaban yang hendak meninggalkan alam semesta akan harus memper-hitungkan kondisi di sisi lain alam semesta. Persamaan Einstein terkenal sulit karena, untuk mengkalkulasi lengkungan ruang di suatu titik, Anda harus mengetahui lokasi semua objek di alam semesta,

yang masing-masingnya berkontribusi pada penekukan ruang. Anda juga harus mengetahui koreksi quantum pada *black hole*, yang saat ini mustahil dikalkulasi. Karena ini terlampau sulit bagi komputer-komputer kita, hari ini fisikawan biasanya menaksir sebuah *black hole* dengan mempelajari alam semesta yang didominasi oleh satu bintang kolaps. Untuk sampai pada pemahaman yang lebih realistis atas dinamika di horison peristiwa *black hole* atau dekat mulut *wormhole*, kita harus mengetahui lokasi dan kandungan energi semua bintang di dekatnya dan mengkomputasi fluktuasi quantum. Lagi, ini sangat sulit. Memecahkan persamaan untuk satu bintang di alam semesta adalah cukup sulit, apalagi miliaran galaksi yang mengapung di alam semesta berinflasi.

Itulah mengapa suatu peradaban yang berupaya melakukan perjalanan menembus *wormhole* akan harus memiliki tenaga komputasi yang jauh melebihi peradaban tipe 0.7 H seperti kita. Barangkali, minimal peradaban, dengan energi dan kandungan informasinya, yang serius mempertimbangkan melakukan lompatan tersebut adalah tipe III Q.

Ada kemungkinan pula bahwa makhluk berakal mungkin tersebar melampaui batasan klasifikasi Kardashev. Sebagaimana dikatakan oleh Sir Martin Rees, "Mungkin sekali bahwa, meskipun kehidupan kini hanya eksis di Bumi, itu pada akhirnya akan menyebar ke galaksi dan selebihnya. Jadi kehidupan mungkin tidak selamanya menjadi jejak kontaminan tak penting di alam semesta, sungguhpun keadaannya sekarang demikian. Nyatanya, saya menganggap itu sebagai

pandangan yang lebih menarik, dan saya pikir bisa berfaedah jika itu diemban bersama secara luas." Tapi dia memperingatkan kita, "Jika kita menghabisi diri kita sendiri, kita akan merusak kemampuan sejati kosmik. Jadi meskipun seseorang percaya bahwa kehidupan di bumi adalah satu-satunya saat ini, tidak berarti bahwa kehidupan akan selamanya menjadi kepingan sepele di alam semesta."

Bagaimana caranya sebuah peradaban maju akan meninggalkan alam semesta sekarat mereka? Ia harus mengatasi serangkaian rintangan besar.

Langkah 1: Menciptakan dan Menguji Theory of Everything

Rintangan pertama bagi sebuah peradaban yang bermaksud meninggalkan alam semesta adalah menyelesaikan *theory of everything*. Entah itu teori string atau bukan, kita harus punya cara untuk mengkalkulasi koreksi quantum pada persamaan Einstein secara handal, atau, kalau tidak, tak satu pun teori kita yang berguna. Untungnya, karena teori-M berkembang pesat, dengan beberapa pemikir terbaik planet ini sedang mengerjakan persamaan ini, kita akan mengetahui apakah ia sungguh-sungguh merupakan *theory of everything* atau *theory of nothing* belaka, dalam bebeberapa dekade atau mungkin kurang.

Setelah *theory of everything* atau teori gravitasi quantum ditemukan, kita harus memverifikasi konsekuensi teori ini menggunakan teknologi maju. Terdapat beberapa kemungkinan, mencakup pembangunan *atom smasher* besar untuk menciptakan superpartikel,

atau bahkan detektor gelombang gravitasi raksasa yang berbasis di antariksa atau di bulan-bulan berbeda di sepanjang tata surya. (Bulan sungguh stabil untuk periode waktu yang panjang, bebas dari erosi disturbansi atmosfer, sehingga sistem detektor gelombang gravitasi planeter semestinya sanggup menyelidiki detil *big bang*, memecahkan setiap pertanyaan yang kita punya mengenai gravitasi quantum dan menciptakan alam semesta baru.)

Sekali teori gravitasi quantum ditemukan, dan pemecah atom dan detektor gelombang gravitasi raksasa telah mengkonfirmasi kebenarannya, maka kita bisa mulai menjawab beberapa pertanyaan esensial menyangkut persamaan Einstein dan *wormhole*:

1. Apakah *wormhole* stabil?

Ketika melewati sebuah *black hole* Kerr yang berotasi, permasalahan yang Anda temui ialah bahwa kehadiran Anda mengganggu *black hole* tersebut; ia dapat kolaps sebelum Anda menyelesaikan perjalanan melewati jembatan Einstein-Rosen. Kalkulasi stabilitas ini harus dikerjakan ulang dengan memperhatikan koreksi quantum, yang mungkin mengubah kalkulasi secara seluruhnya.

2. Apakah terdapat divergensi?

Jika kita melewati *transversable wormhole* (*wormhole* yang bisa dilintangi/diseberangi—penj) yang menghubungkan dua era waktu, maka penambahan radiasi di sekitar pintu masuk *wormhole* menjadi tak terhingga, yang akan membawa malapetaka. (Ini karena radiasi dapat melewati *wormhole*, pergi ke masa lalu, dan kembali setelah bertahun-tahun untuk memasuki *wormhole* untuk kedua kalinya.

Proses ini dapat berulang tak terhingga, mengakibatkan penambahan radiasi yang tak terhingga. Namun, permasalahan ini bisa dipecahkan jika teori *many-worlds* berlaku, sehingga alam semesta terbelah setiap kali radiasi melewati *wormhole*, dan tidak ada penambahan radiasi tak terhingga. Kita memerlukan *theory of everything* untuk menjawab pertanyaan sulit ini.)

3. Dapatkah kita menemukan energi negatif dalam jumlah besar?

Energi negatif, bahan kunci yang dapat membuka dan menstabilkan *wormhole*, sudah diketahui eksis, hanya saja dalam jumlah kecil. Dapatkah kita menemukan jumlah yang cukup untuk membuka dan menstabilkan *wormhole*?

Asumsikan saja jawaban atas pertanyaan-pertanyaan ini bisa ditemukan, maka sebuah peradaban maju mungkin mulai serius memikirkan cara untuk meninggalkan alam semesta, atau menghadapi kepunahan pasti. Terdapat beberapa alternatif.

Langkah 2: Menemukan Wormhole dan White Hole Alami

Wormhole, gerbang dimensi, dan string kosmik mungkin eksis secara alami di luar angkasa. Pada jenak *big bang*, ketika terdapat energi berjumlah besar yang dilepaskan ke alam semesta, *wormhole* dan string kosmik bisa terbentuk secara alami. Inflasi alam semesta awal kemudian dapat memperluas *wormhole* ini hingga ukuran makroskopis. Di samping itu, ada kemungkinan bahwa materi eksotis atau materi negatif eksis secara alami di angkasa luar. Ini akan sangat membantu upaya untuk meninggalkan alam semesta sekarat. Namun,

tidak ada jaminan bahwa objek semacam itu eksis di alam. Tak ada seorang pun yang pernah melihat objek ini, dan terlalu beresiko untuk mempertaruhkan nasib seluruh makhluk berakal pada asumsi ini.

Berikutnya, ada kemungkinan bahwa "*white hole*" bisa ditemukan dengan memindai angkasa. *White hole* adalah solusi persamaan Einstein di mana waktu dibalik, sehingga objek-objek disemburkan dari *white hole* dengan cara yang sama ketika objek terhisap ke dalam *black hole*. *White hole* mungkin ditemukan di ujung lain *black hole*, sehingga materi yang memasuki *black hole* akhirnya keluar dari *white hole*. Sejauh ini, semua pencarian astronomis belum menemukan bukti adanya *white hole*, tapi eksistensi mereka mungkin bisa dikonfimasi atau dibantah dengan detektor berbasis antariksa generasi berikutnya.

Langkah 3: Mengirim Satelit Melewati Black Hole

Terdapat manfaat nyata dalam penggunaan *black hole* sebagai *wormhole*. *Black hole*, sebagaimana telah kita temukan, sungguh berlimpah di alam semesta; bila seseorang bisa memecahkan banyak permasalahan teknis, *black hole* harus dipertimbangkan secara serius oleh suatu peradaban maju sebagai lubang pelarian dari alam semesta kita. Selain itu, dalam melewati *black hole*, kita tidak dibatasi oleh batasan waktu masa lalu yang tidak bisa kita tempuh sebelum penciptaan mesin waktu. *Wormhole* di pusat cincin Kerr mungkin menghubungkan alam semesta kita dengan alam semesta yang sungguh berbeda atau titik berbeda di alam semesta kita. Satu-satunya cara untuk mengetahui adalah bereksperimen dengan satelit dan

menggunakan superkomputer untuk mengkalkulasi distribusi massa di alam semesta-alam semesta tersebut dan mengkalkulasi koreksi quantum pada persamaan Einstein menerobos *wormhole*.

Sekarang ini, kebanyakan fisikawan percaya bahwa perjalanan melewati *black hole* akan sangat fatal. Bagaimanapun, pemahaman kita atas fisika *black hole* masih dalam masa pertumbuhan, dan penaksiran ini belum pernah diuji. Asumsikan, sebagai argumen, bahwa perjalanan melewati *black hole* mungkin dilakukan, terutama melewati *black hole* Kerr yang berotasi. Maka suatu peradaban maju akan memberikan penalaran serius pada penyelidikan interior *black hole*.

Karena perjalanan melewati *black hole* akan menjadi perjalanan satu arah, dan karena adanya bahaya besar yang ditemukan dekat *black hole*, sebuah peradaban maju kemungkinan besar akan mencoba menemukan *black hole* bintang dekat dan pertama-tama mengirim satelit melewatinya. Informasi berharga bisa dikirim kembali dari satelit tersebut sampai ia akhirnya menyeberangi horison peristiwa dan seluruh kontak terputus. (Perjalanan melewati horison peristiwa kemungkinan besar sungguh mematikan lantaran adanya medan radiasi intens di sekitarnya. Sinar cahaya yang jatuh ke *black hole* akan teringsutbirukan dan dengan demikian akan bertambah energinya selagi mendekati pusatnya.) Satelit yang melintas mendekati horison peristiwa harus diberi perisai secara benar terhadap berondongan radiasi intens ini. Di samping itu, ini bisa mendestabilisasi *black hole* itu sendiri, sehingga horison peristiwa akan

menjadi singularitas, dengan begitu menutup *wormhole.* Satelit akan menetapkan secara akurat berapa banyak radiasi yang terdapat dekat horison peristiwa dan apakah *wormhole* bisa tetap stabil kendati terdapat semua fluks energi ini.

Data dari satelit sebelum ia memasuki horison peristiwa harus diradiokan balik ke kapal antariksa dekat, tapi di situlah persoalan lain menanti. Bagi seorang pengamat di salah satu kapal antariksa itu, satelit akan terlihat melambat sewaktu mendekati horison peristiwa. Saat memasuki horison peristiwa, satelit tersebut kenyataannya akan terlihat membeku dalam waktu. Untuk menghindari persoalan ini, satelit harus meradiokan datanya pada jarak tertentu dari horison peristiwa, atau, kalau tidak, sinyal radio akan teringsutmerahkan sehingga data tidak akan bisa dikenali.

Langkah 4: Mengkonstruksi Black Hole Secara Bertahap

Setelah karakteristik dekat horison peristiwa *black hole* dipastikan secara seksama oleh satelit, langkah berikutnya adalah menciptakan *black hole* secara bertahap untuk tujuan eksperimen. Peradaban tipe III mungkin mencoba mereproduksi temuan yang diisyaratkan dalam makalah Einstein—bahwa *black hole* tidak pernah bisa terbentuk dari kumpulan debu dan partikel yang berputar beterbangan. Einstein mencoba menunjukkan bahwa sekumpulan partikel yang berputar tidak akan mencapai radius Schwarzschild dengan sendirinya (dan alhasil *black hole* adalah mustahil).

Kumpulan yang berputar mungkin tidak berkontraksi menjadi

black hole dengan sendirinya. Tapi ini membuka kemungkinan bahwa seseorang dapat secara artifisial menyuntikkan energi dan materi baru secara perlahan ke sistem yang berputar, memaksa kumpulan tersebut secara bertahap menjangkau radius Schwarzschild. Dengan cara ini, sebuah peradaban bisa memanipulasi pembentukan *black hole* secara terkendali.

Contohnya, seseorang dapat membayangkan peradaban tipe III yang mengumpulkan bintang neutron, yang kira-kira seukuran Manhattan tapi berbobot lebih besar daripada Matahari, dan membentuk kumpulan berputar dari bintang mati ini. Gravitasi akan secara bertahap mendekatkan bintang-bintang ini. Tapi mereka tidak akan pernah menyentuh radius Schwarzschild, sebagaimana ditunjukkan Einstein. Pada titik ini, ilmuwan dari peradaban maju ini dapat secara hati-hati menyuntikkan bintang neutron baru ke campuran tersebut. Ini mungkin cukup untuk merobohkan keseimbangan, menyebabkan kumpulan material bintang berputar ini kolaps ke bawah radius Schwarzschild. Alhasil, kumpulan bintang akan kolaps menjadi cincin yang berputar, *black hole* Kerr. Dengan mengendalikan kecepatan dan radius berbagai bintang neutron, peradaban semacam itu akan membuat *black hole* Kerr terbuka secara perlahan sebagaimana yang dikehendakinya.

Atau, sebuah peradaban maju dapat mencoba merangkai bintang-bintang neutron kecil menjadi satu kumpulan tak bergerak, hingga ukurannya mencapai 3 massa surya, yang merupakan kurang-lebih batas Chandrasekhar untuk bintang neutron. Melebihi batas ini,

bintang akan meledak ke dalam menjadi *black hole* akibat gravitasinya sendiri. (Peradaban maju harus berhati-hati agar pembentukan *black hole* tidak menimbulkan ledakan mirip supernova. Kontraksi menjadi *black hole* harus dilakukan dengan sangat bertahap dan sangat akurat.)

Tentu saja, bagi seseorang yang melewati horison peristiwa, dijamin itu menjadi perjalanan satu arah. Tapi bagi peradaban maju yang menghadapi kepastian kepunahan, perjalanan satu arah merupakan satu-satunya alternatif. Tetap saja terdapat persoalan radiasi sewaktu seseorang melewati horison peristiwa. Sorot cahaya yang mengikuti kita melewati horison peristiwa menjadi lebih energetik, sementara frekuensinya meningkat. Ini kemungkinan akan menimbulkan hujan radiasi yang akan mematikan bagi astronot yang melewati horison peristiwa. Suatu peradaban maju harus mengkalkulasi jumlah akurat radiasi demikian dan membangun perisai yang benar untuk mencegah penggorengan.

Terakhir, terdapat persoalan stabilitas: akankah *wormhole* di pusat cincin Kerr cukup stabil untuk dilewati sepenuhnya? Matematika pertanyaan ini sama sekali tidak jelas, sebab kita harus menggunakan teori gravitasi quantum untuk mengerjakan kalkulasi yang benar. Mungkin saja ternyata cincin Kerr bersifat stabil di bawah kondisi terbatas tertentu selagi materi melewati *wormhole*. Isu ini harus dipecahkan secara teliti menggunakan matematika gravitasi quantum dan eksperimen *black hole* sendiri.

Ringkasnya, perjalanan melewati *black hole* tak diragukan lagi akan

sangat sukar dan berbahaya. Secara teoritis, itu tidak bisa dikesampingkan sampai eksperimen ekstensif dilakukan dan kalkulasi yang tepat dihasilkan dari semua koreksi quantum.

Langkah 5: Menciptakan Bayi Alam Semesta

Sejauh ini, kita berasumsi bahwa perjalanan melewati *black hole* mungkin untuk dilakukan. Sekarang, mari kita berasumsi sebaliknya, bahwa *black hole* terlalu tidak stabil dan terlalu penuh dengan radiasi mematikan. Dengan demikian seseorang mungkin mencoba jalur yang lebih sulit lagi: menciptakan alam semesta. Konsep menciptakan lubang pelarian menuju alam semesta lain oleh sebuah peradaban maju telah membangkitkan minat fisikawan seperti Alan Guth. Karena teori inflasi begitu bergantung kepada pembentukan *false vacuum*, Guth ingin tahu apakah suatu peradaban maju dapat secara artifisial menciptakan *false vacuum* dan menghasilkan bayi alam semesta di laboratorium.

Mulanya, ide menciptakan alam semesta terasa gila-gilaan. Bagaimanapun juga, sebagaimana dijelaskan oleh Guth, untuk menciptakan alam semesta kita, Anda memerlukan 10^{89} foton, 10^{89} elektron, 10^{89} positron, 10^{89} neutrino, 10^{89} antineutrino, 10^{89} proton, dan 10^{89} neutron. Sementara tugas ini terdengar mengerikan, Guth mengingatkan kita bahwa walaupun kandungan materi/energi alam semesta sungguh besar, itu diseimbangkan oleh energi negatif yang diperoleh dari gravitasi. Netto total materi/energi mungkin sekecil satu ons. Guth memperingatkan, "Apakah ini berarti hukum fisika sungguh-

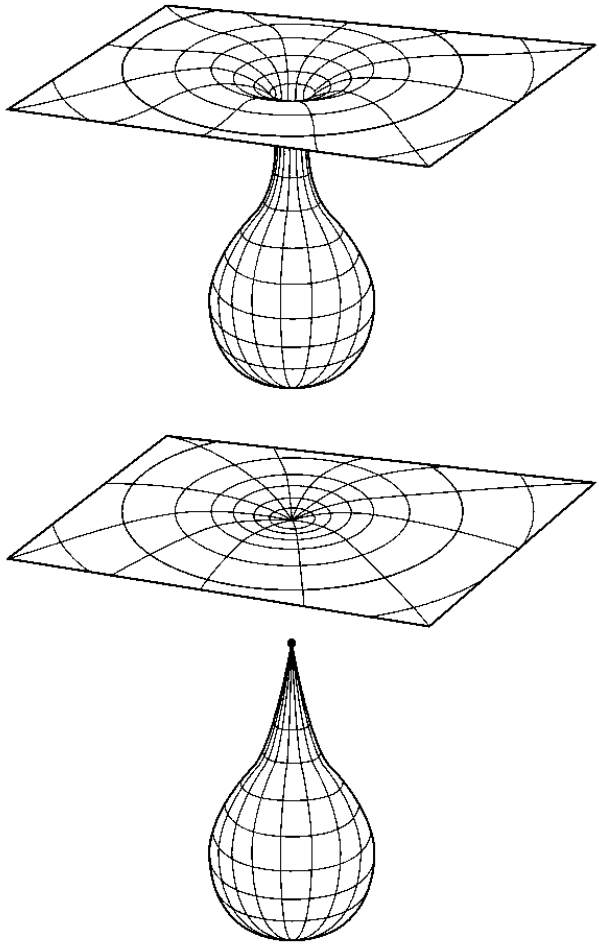
sungguh memperkenankan kita untuk menciptakan alam semesta baru semaunya? Sayangnya, jika kita mencoba melaksanakan ini, kita akan segera menemui rintangan tak terduga yang mengganggu: karena bola *false vacuum* berdiameter 10^{-26} cm memiliki massa satu ons, densitasnya sangat luar biasa, 10^{80} gram per cm^3! ...Jika massa seluruh alam semesta yang teramati dimampatkan hingga densitas *false vacuum*, itu akan masuk ke dalam volume yang lebih kecil dari sebuah atom!" *False vacuum* akan menjadi kawasan kecil ruang-waktu di mana instabilitas timbul dan terjadi retakan di ruang-waktu. Mungkin hanya diperlukan beberapa ons materi dalam *false vacuum* untuk menciptakan bayi alam semesta, tapi jumlah materi yang kecil ini harus dimampatkan hingga jarak sangat kecil.

Masih ada cara lain untuk menciptakan bayi alam semesta. Seseorang dapat memanaskan kawasan kecil ruang hingga 10^{29} derajat K, lalu mendinginkannya dengan cepat. Pada temperatur ini, diperkirakan ruang-waktu menjadi tak stabil; gelembung-gelembung kecil alam semesta akan mulai terbentuk, dan *false vacuum* dapat tercipta. Bayi-bayi alam semesta ini, yang terbentuk sepanjang waktu tapi berumur pendek, dapat menjadi alam semesta riil pada temperatur tersebut. Fenomena ini sudah familiar pada medan listrik biasa. (Contoh, jika kita menciptakan medan listrik yang cukup besar, pasangan virtual elektron-antielektron yang terus-menerus muncul dan menghilang dari kevakuman bisa mendadak menjadi riil, memungkinkan partikel-partikel ini untuk eksis. Dengan demikian, energi yang terkonsentrasi di ruang hampa dapat mengubah partikel

virtual menjadi partikel riil. Demikian halnya, jika pada satu titik kita mempergunakan energi yang cukup, diteorikan bahwa bayi alam semesta virtual dapat eksis, muncul entah dari mana.)

Asumsikan bahwa densitas atau temperatur tak terbayangkan tersebut bisa dicapai, maka pembentukan bayi alam semesta akan seperti berikut. Di alam semesta kita, sinar laser dan sorot partikel yang kuat dapat digunakan untuk memampatkan dan memanaskan sejumlah kecil materi hingga mencapai energi dan temperatur fantastis. Kita tidak akan pernah melihat bayi alam semesta saat ia mulai terbentuk, sebab ia mengembang di "sisi lain" singularitas, ketimbang di alam semesta kita. Bayi alam semesta ini kemungkinan berinflasi di *hyperspace* lewat gaya antigravitasinya sendiri dan "berpucuk" dari alam semesta kita. Oleh sebab itu, kita takkan pernah melihat alam semesta baru sedang terbentuk di sisi lain singularitas. Tapi *wormhole* akan, seperti tali pusar, menghubungkan kita dengan alam semesta baru.

Bagaimanapun, terdapat bahaya tertentu dalam menciptakan alam semesta di oven. Tali pusar yang menghubungkan alam semesta kita dengan bayi alam semesta pada akhirnya akan menguap dan menghasilkan radiasi Hawking yang setara dengan ledakan nuklir 500 kiloton, kurang-lebih 25 kali lebih besar dari energi bom Hiroshima. Jadi ada harga yang harus dibayar untuk menciptakan alam semesta baru di oven.



Gambar 13: Bayi alam semesta dapat secara artifisial diciptakan oleh sebuah peradaban maju dalam beberapa cara. Beberapa ons materi dapat dikonsentrasikan hingga mencapai densitas dan energi sangat besar, atau materi dapat dipanaskan mendekati temperatur Planck.

Satu persoalan terakhir dalam skenario menciptakan *false vacuum* ini ialah bahwa akan sangat mudah bagi alam semesta baru untuk kolaps menjadi *black hole,* yang, ingat, kita asumsikan akan mematikan. Alasan atas hal ini ialah teorema Penrose, yang menyata-

kan bahwa, pada berbagai skenario, konsentrasi tinggi massa yang cukup besar tak pelak lagi akan kolaps menjadi sebuah *black hole*. Karena persamaan Einstein adalah invarian pembalikan waktu, yakni, dapat berjalan ke waktu depan atau ke waktu belakang, ini berarti setiap materi yang jatuh dari bayi alam semesta kita bisa berjalan ke waktu belakang, menghasilkan *black hole*. Jadi, seseorang harus sangat berhati-hati dalam mengkonstruksi bayi alam semesta guna menghindari teorema Penrose.

Teorema Penrose bersandar pada asumsi bahwa materi yang jatuh masuk adalah berenergi positif (seperti dunia familiar yang kita lihat di sekitar kita). Namun, teorema ini runtuh jika kita mempunyai energi negatif atau materi negatif. Dengan demikian, pada skenario inflasi sekalipun, kita harus mendapatkan energi negatif untuk menciptakan bayi alam semesta, sebagaimana pada metode *transversable wormhole*.

Langkah 6: Menciptakan Atom Smasher Raksasa

Bagaimana bisa kita membangun mesin yang mampu meninggalkan alam semesta kita, jika akses terhadap teknologi tinggi sangat terbatas? Pada titik mana kita bisa berharap memanfaatkan tenaga energi Planck? Pada saat sebuah peradaban telah mencapai status tipe III, ia telah mempunyai kemampuan untuk memanipulasi energi Planck, secara definisi. Ilmuwan akan mampu bermain-main dengan *wormhole* dan mengumpulkan cukup energi untuk membuka lubang di ruang dan waktu.

Terdapat beberapa cara yang mungkin ditempuh sebuah peradaban maju untuk melakukan hal ini. Sebagaimana saya sebutkan sebelumnya, alam semesta kita mungkin merupakan sebuah membran, bersama dengan alam semesta paralel yang berjarak 1 milimeter saja dari alam semesta kita, mengapung di *hyperspace*. Jika demikian, maka Large Hadron Collider mungkin dapat mendeteksinya dalam beberapa tahun ke depan. Pada saat kita maju menuju peradaban tipe I, kita mungkin bahkan mempunyai teknologi untuk menggali sifat alam semesta tetangga ini. Jadi, konsep pengadaan kontak dengan alam semesta paralel mungkin bukan merupakan ide yang terlalu dibuat-buat.

Tapi mari kita asumsikan perkara terburuk, bahwa level energi timbulnya efek-efek gravitasi quantum adalah energi Planck, yang satu quadriliunan kali lebih besar daripada energi LHC. Untuk menggali energi Planck, sebuah peradaban tipe III harus menciptakan pemecah atom seukuran bintang. Dalam pemecah atom, atau akselerator partikel, partikel-partikel subatom menempuh pipa sempit. Saat energi disuntikkan ke dalam pipa, partikel-partikel diakselerasi hingga mencapai energi tinggi. Bila kita menggunakan magnet raksasa untuk menekuk jalur partikel menjadi lingkaran besar, maka partikel-partikel dapat diakselerasi hingga energi triliunan eV. Semakin besar jari-jari lingkaran, semakin besar energi sorot partikel. LHC memiliki diameter 27 kilometer, yang mendorong batas energi yang tersedia bagi peradaban tipe 0.7.

Tapi untuk peradaban tipe III, kemungkinannya terbuka untuk

membuat pemecah atom berukuran tata surya atau bahkan sistem bintang. Ada kemungkinan bahwa sebuah peradaban maju dapat menembakkan sorot partikel subatom ke luar angkasa dan mengakselerasinya hingga mencapai energi Planck. Sebagaimana kita ingat, dengan akselerator partikel generasi baru, dalam beberapa dekade ke depan para fisikawan mungkin sanggup menciptakan akselerator meja yang mampu mencapai 200 GeV (200 miliar eV) pada jarak satu meter. Dengan menumpuk akselerator-akselerator meja ini, ada kemungkinan seseorang bisa mencapai level energi timbulnya ketidakstabilan ruang-waktu.

Jika kita asumsikan bahwa akselerator masa depan bisa mendorong partikel sebesar 200 GeV per meter saja, yang merupakan asumsi konservatif, kita membutuhkan akselerator partikel berpanjang 10 tahun-cahaya untuk mencapai energi Planck. Walaupun ini sangat besar bagi peradaban tipe I atau II, ini sudah dijangkau oleh kemampuan peradaban tipe III. Untuk membangun pemecah atom seraksasa itu, peradaban tipe III dapat menekuk jalur sorot menjadi lingkaran, sehingga menghemat banyak ruang, atau membiarkan jalur terentang lurus hingga membentang melewati bintang terdekat.

Seseorang dapat, misalnya, membangun pemecah atom yang menembakkan partikel subatom di sepanjang jalur sirkuler di sabuk asteorid. Anda tidak perlu membangun potongan pipa sirkuler mahal, sebab kevakuman luar angkasa lebih bagus daripada kevakuman yang bisa kita ciptakan di Bumi. Tapi Anda harus membangun magnet raksasa, ditempatkan pada interval teratur di bulan-bulan dan

asteroid-asteroid jauh di tata surya atau di berbagai sistem bintang, yang akan secara periodik menekuk sorot.

Ketika sorot mendekati bulan atau asteroid, magnet-magnet raksasa yang berbasis di bulan akan merenggut sorot tersebut, mengubah arahnya dengan sangat sedikit. (Stasiun bulan atau asteroid harus pula memfokuskan ulang sorot tersebut pada interval teratur, sebab semakin jauh berjalan, sorot secara bertahap akan berdivergensi/menyimpang.) Selagi sorot melintasi beberapa bulan, ia akan secara bertahap membentuk busur. Pada akhirnya, sorot akan berjalan kurang-lebih dalam bentuk lingkaran. Seseorang bisa juga membayangkan dua sorot, yang satu berjalan sesuai arah jarum jam mengelilingi tata surya, dan yang satunya lagi berlawanan arah jarum jam. Ketika kedua sorot bertubrukan, energi yang dilepaskan oleh tubrukan materi/antimateri akan menghasilkan energi mendekati energi Planck. (Seseorang bisa mengkalkulasi bahwa medan magnet yang diperlukan untuk menekuk sorot sedemikian kuat jauh melampaui teknologi hari ini. Namun, ada kemungkinan bahwa sebuah teknologi maju dapat memakai bahan peledak untuk mengirim *surge* energi kuat lewat kumparan untuk menciptakan getaran magnet besar. Semburan energi magnet yang sangat besar ini hanya bisa dilepaskan satu kali, sebab kemungkinan akan merusak kumparan, jadi magnet harus cepat-cepat diganti sebelum sorot partikel kembali pada perlintasan berikutnya.)

Di samping persoalan teknis menghebohkan dalam menciptakan pemecah atom demikian besar, terdapat pula pertanyaan sulit tentang

apakah ada batas pada energi sorot partikel. Sorot energetik partikel pada akhirnya akan bertubrukan dengan foton yang menyusun radiasi latar 2,7 derajat dan karenanya kehilangan energi. Secara teori, ini dapat, kenyataannya, mengeluarkan begitu banyak energi dari sorot sehingga akan terdapat batas tertinggi energi yang yang bisa dicapai oleh seseorang di luar angkasa. Temuan ini masih belum dicek secara eksperimen. (Kenyataannya, ada indikasi bahwa tubrukan sinar kosmik energetik sudah melampaui energi maksimum ini, menimbulkan keraguan terhadap seluruh kalkulasi.) Namun, jika itu benar, maka modifikasi yang lebih mahal atas piranti harus dilakukan. Pertama, seseorang dapat melingkungi seluruh sorot dalam pipa vakum dengan perisai untuk mencegah masuknya radiasi latar 2,7 derajat. Atau, jika eksperimen tersebut dikerjakan jauh di masa mendatang, mungkin saja radiasi latarnya akan cukup kecil sehingga tak lagi menjadi soal.

Langkah 7: Menciptakan Mekanisme Implosi

Seseorang dapat pula membayangkan perangkat kedua, berbasis sinar laser dan mekanisme implosi. Di alam, temperatur dan tekanan yang sangat tinggi dicapai melalui metode implosi, seperti ketika sebuah bintang sekarat kolaps secara tiba-tiba akibat gaya gravitasi. Ini bisa terjadi karena gravitasi hanya menarik, tidak menolak, dan karenanya kekolapsan terjadi secara seragam, sehingga bintang termampatkan secara merata hingga densitas luar biasa.

Metode implosi ini sangat sulit untuk direproduksi di planet Bumi.

Bom hidrogen, misalnya, harus dirancang seperti jam Swiss agar lithium deuteride, bahan aktif bom hidrogen, termampatkan hingga puluhan juta derajat untuk mencapai kriteria Lawson, di mana proses fusi mendobrak. (Ini dilakukan dengan meledakkan bom atom di sebelah lithium deuteride, dan kemudian memfokuskan radiasi sinar X secara merata ke permukaan sepotong lithium deuteride.) Namun, proses ini hanya dapat melepaskan energi secara eksplosif, bukan secara terkendali.)

Di Bumi, upaya menggunakan magnetisme untuk memampatkan gas kaya hidrogen telah gagal, utamanya karena gaya magnet tidak memampatkan gas secara seragam. Karena kita belum pernah melihat monokutub di alam, medan magnet adalah dwikutub, seperti medan magnet Bumi. Alhasil, mereka tidak seragam. Mempergunakan mereka untuk memeras gas ialah seperti mencoba memeras sebuah balon. Setiap kali Anda memeras ujung yang satu, ujung balon yang lainnya akan menonjol.

Cara lain pengendalian fusi adalah menggunakan sederetan slnar laser, disusun di sepanjang permukaan sebuah bola, sehingga sinarnya tertembakkan secara radial ke sebutir kecil lithium deuteride di pusat. Contohnya, di Livermore National Laboratory, terdapat perangkat laser/fusi canggih yang dipakai untuk mensimulasikan senjata nuklir. Ia menembakkan serangkaian sinar laser secara horisontal menempuh sebuah terowongan. Lalu cermin-cermin yang ditempatkan di ujung terowongan memantulkan tiap-tiap sinar secara seksama, sehingga sinar terarahkan secara radial ke sebutir kecil [lithium

deuteride]. Permukaan butir tersebut segera menguap, menyebabkan butir berimplosi dan menghasilkan temperatur tinggi. Dengan cara ini, fusi betul-betul terlihat di dalam butir (walaupun mesin meng-konsumsi lebih banyak energi daripada yang dihasilkannya dan karenanya tidak dapat dikembangkan secara komersial).

Demikian halnya, seseorang dapat membayangkan sebuah peradaban tipe III membangun tumpukan besar sinar laser di asteorid dan bulan di berbagai sistem bintang. Deretan laser ini akan meletus secara serentak, melepaskan serangkaian sinar sangat kuat yang berkonvergensi di satu titik, menghasilkan temperatur terjadinya ketidakstabilan ruang dan waktu.

Secara prinsip, tidak ada batas teoritis pada besaran energi yang dapat seseorang tetapkan terhadap sinar laser. Namun, terdapat persoalan praktis dalam menciptakan laser bertenaga tinggi. Salah satu persoalan utama adalah stabilitas material laser, yang akan sering terlalu panas dan retak pada energi tinggi. (Ini bisa diatasi dengan mendorong sinar laser oleh sebuah ledakan yang terjadi satu kali saja, seperti peledakan nuklir.)

Tujuan penembakan tumpukan bundar sinar laser ini adalah untuk memanaskan *chamber* supaya *false vacuum* tercipta di dalamnya, atau untuk mengimplosikan dan memampatkan seperangkat pelat guna menghasilkan energi negatif lewat efek Casimir. Untuk menciptakan perangkat energi negatif demikian, seseorang harus memampatkan seperangkat pelat bundar hingga kurang dari panjang Planck, yakni 10^{-33} centimeter. Karena jarak yang memisahkan atom-atom adalah 10^{-}

^{8} cm, dan jarak yang memisahkan proton dan neutron dalam nukleus adalah 10^{-13} cm, Anda melihat bahwa pemampatan pelat-pelat ini pasti besar sekali. Karena watt total yang bisa dihimpun oleh seseorang pada sinar laser esensinya tak terbatas, persoalan utamanya adalah menciptakan piranti yang cukup stabil untuk bertahan dari pemampatan sangat besar ini. (Karena efek Casimir menghasilkan tarikan netto di antara pelat-pelat, kita juga harus menambahkan muatan pada pelat untuk mencegah mereka kolaps.) Secara prinsip, sebuah *wormhole* akan berkembang dalam cangkang bundar yang menghubungkan alam semesta sekarat kita dengan alam semesta yang jauh lebih muda dan jauh lebih panas.

Langkah 8: Membangun Mesin Warp Drive

Satu elemen kunci yang diperlukan dalam merakit perangkat yang dilukiskan di atas adalah kemampuan untuk menempuh jarak antarbintang yang luas sekali. Cara potensial untuk melakukannya adalah menggunakan mesin *warp drive* Alcubierre, sebuah mesin yang pertama kali diusulkan oleh fisikawan Miguel Alcubierre pada 1994. Mesin *warp drive* tidak mengubah topologi ruang dengan membuat lubang dan melompat ke *hyperspace*. Ia hanya menyusutkan ruang di depan Anda sambil memperluas ruang di belakang Anda. Bayangkan berjalan melintasi karpet untuk menjangkau sebuah meja. Ketimbang berjalan di atas karpet, Anda bisa menjerat meja dengan laso dan menariknya secara perlahan ke arah Anda, menjadikan karpet berimpitan di depan Anda. Dengan demikian, Anda bergerak sedikit

saja; sebaliknya, ruang di depan Anda telah menyusut.

Ingat bahwa ruang sendiri dapat mengembang lebih cepat daripada kecepatan cahaya (sebab tidak ada informasi netto yang ditransfer oleh ruang hampa yang mengembang). Demikian halnya, kita mungkin dapat berjalan lebih cepat daripada kecepatan cahaya dengan menyusutkan ruang secara lebih cepat dari cahaya. Praktisnya, saat bepergian menuju bintang dekat, kita hampir tidak meninggalkan Bumi sama sekali; kita cukup mengkolapskan ruang di depan kita dan memperluas ruang di belakang kita. Bukannya pergi ke Alpha Centauri, bintang terdekat, kita membawa Alpha Centauri menuju kita.

Alcubierre menunjukkan bahwa ini merupakan solusi masuk akal atas persamaan Einstein—artinya itu masuk dalam jangkauan hukum fisika. Tapi ada harga yang harus dibayar. Anda harus menggunakan energi negatif dan positif dalam jumlah besar untuk mentenagai kapal bintang Anda. (Energi positif bisa dipakai untuk memampatkan ruang di depan Anda dan energi negatif untuk memperpanjang ruang jarak di belakang Anda.) Untuk menggunakan efek Casimir demi menghasilkan energi negatif ini, pelat-pelat harus dipisahkan oleh jarak Planck, 10^{-33} cm—terlampau kecil untuk dicapai dengan cara biasa. Untuk membangun kapal bintang demikian, Anda harus mengkonstruksi sebuah bola besar dan menempatkan penumpang di dalamnya. Di sisi-sisi bola tersebut, Anda menaruh sekumpulan energi negatif di sepanjang khatulistiwanya. Penumpang di dalam bola takkan pernah bergerak, tapi ruang di depan bola akan menyusut

lebih cepat daripada cahaya, sehingga saat para penumpang meninggalkan bola, mereka telah mencapai bintang dekat.

Dalam artikel awalnya, Alcubierre menyebutkan bahwa solusinya mungkin tak hanya membawa kita menuju bintang-bintang, tapi juga memungkinkan perjalanan waktu. Dua tahun kemudian, fisikawan Allen E. Everett menunjukkan bahwa bila seseorang mempunyai dua kapal bintang demikian, perjalanan waktu akan mungkin dilakukan dengan menerapkan *warp drive* secara berturut-turut. Sebagaimana dikatakan oleh fisikawan Princeton, Gott, "Dengan demikian, kelihatannya Gene Roddenberry, pembuat *Star Trek*, memang tepat memasukkan semua episode perjalanan waktu itu!"

Tapi sebuah analisis terkemudian oleh fisikawan Rusia, Sergei Krasnikov, mengungkap cacat teknis dalam solusi tersebut. Dia menunjukkan bahwa bagian dalam kapal bintang tersebut terputus dari ruang di luar kapal, sehingga pesan tidak bisa menyeberangi perbatasan—yakni, sekali berada di dalam kapal bintang, Anda tidak dapat mengubah jalurnya. Jalurnya harus dipersiapkan sebelum melakukan perjalanan. Ini mengecewakan. Dengan kata lain, Anda betul-betul tidak bisa memutar nomor di dasbor dan menyetel arah menuju bintang terdekat. Tapi itu mengandung arti bahwa kapal bintang teoritis tersebut bisa menjadi rel menuju bintang-bintang, sebuah sistem antarbintang di mana kapal bintang berangkat dengan interval teratur. Seseorang dapat, misalnya, membangun rel ini dengan terlebih dahulu memakai roket konvensional yang berjalan di bawah kecepatan cahaya untuk membangun stasiun rel pada interval

teratur di antara bintang-bintang. Lalu kapal bintang akan berjalan di antara stasiun-stasiun ini di atas kecepatan cahaya berdasarkan daftar perjalanan, dengan jadwal keberangkatan dan kedatangan tetap.

Gott menulis, "Superperadaban masa depan mungkin ingin memasang jalur *warp drive* di antara bintang-bintang untuk perlintasan kapal bintang, persis sebagaimana ia membangun mata rantai *wormhole* di antara bintang-bintang. Jaringan jalur *warp drive* mungkin lebih mudah dibuat daripada jaringan *wormhole* sebab *warp drive* hanya mengharuskan pengubahan ruang yang ada ketimbang pembangunan lubang-lubang baru yang menghubungkan kawasan-kawasan jauh."

Tapi karena kapal bintang demikian harus berjalan dalam alam semesta yang eksis, ia tidak dapat digunakan untuk meninggalkan alam semesta. Namun begitu, drive Alcubierre bisa membantu mengkonstruksi perangkat untuk lari dari alam semesta. Kapal bintang demikian mungkin berguna, misalnya, dalam menciptakan tubrukan string kosmik yang disebutkan oleh Gott, yang mungkin membawa sebuah peradaban maju kembali ke masa lalunya, ketika alam semestanya jauh lebih hangat.

Langkah 9: Menggunakan Energi Negatif Dari Kondisi Terperas

Di bab 5, saya menyebutkan bahwa sinar laser dapat menciptakan "kondisi terperas" (*squeezed states*) yang dapat dipakai untuk menghasilkan materi negatif, yang pada gilirannya dapat dipakai

untuk membuka dan menstabilkan *wormhole*. Ketika getaran sinar laser sangat kuat mengenai material optik khusus, itu menghasilkan pasangan-pasangan foton segera sesudahnya. Foton-foton ini secara bergantian mempertinggi dan menekan fluktuasi quantum yang didapati di ruang vakum, menghasilkan getaran energi positif dan negatif. Jumlah dua getaran energi ini selalu merata-rata menjadi energi positif, sehingga kita tidak melanggar hukum fisika yang dikenal.

Pada 1978, fisikawan Lawrence Ford di Universitas Tufts membuktikan tiga hukum yang harus dipatuhi oleh energi negatif semacam itu, dan hukum tersebut telah menjadi subjek penelitian intens sejak saat itu. Pertama, Ford menemukan bahwa besaran getaran energi negatif bertalian terbalik dengan jangkauan ruang dan waktunya—yakni, semakin kuat getaran energi negatifnya, semakin pendek durasinya. Jadi bila kita menciptakan ledakan besar energi negatif dengan laser untuk membuka *wormhole*, itu hanya bisa berlangsung dalam waktu yang amat singkat. Kedua, getaran negatif selalu diikuti oleh getaran energi positif bermagnitudo besar (sehingga jumlahnya tetap positif). Ketiga, semakin panjang interval di antara dua getaran ini, semakin besar getaran positifnya.

Dengan tiga hukum ini, seseorang dapat mengukur kondisi di mana laser atau pelat Casimir bisa menghasilkan energi negatif. Pertama, seseorang bisa mencoba memisahkan getaran energi negatif dari getaran energi positif terkemudian dengan menyorotkan sinar laser ke sebuah kotak dan menutup *shutter* (pengatur cahaya) segera setelah

getaran energi negatif masuk. Alhasil, hanya getaran energi negatif yang akan memasuki kotak. Secara prinsip, energi negatif dalam jumlah besar dapat diekstrak dengan cara ini, diikuti oleh getaran energi positif yang lebih besar (yang dicegah masuk kotak oleh *shutter*). Interval antara kedua getaran bisa panjang sekali, selama getaran energi positifnya besar. Secara teori, ini merupakan cara ideal untuk menghasilkan energi negatif dalam jumlah tak terbatas untuk mesin waktu dan *wormhole.*

Sayangnya, terdapat kesulitan tersembunyi. Tindakan menutup *shutter* menghasilkan getaran energi positif kedua di dalam kotak. Getaran energi negatif akan tersapu bersih, kecuali jika diambil langkah pencegahan luar biasa. Ini akan terus menjadi langkah teknologis yang harus dipecahkan oleh peradaban maju—memisahkan getaran energi negatif yang kuat dari getaran energi positif terkemudian tanpa membuat getaran energi positif kedua menyapu bersih getaran energi negatif.

Tiga hukum ini bisa diterapkan pada efek Casimir. Jika kita menghasilkan *wormhole* berukuran satu meter, kita harus mengkonsentrasikan energi negatif dalam pita yang tak lebih dari 10^{-22} meter (seperjuta ukuran proton). Sekali lagi, hanya sebuah peradaban amat maju yang sanggup menciptakan teknologi yang diperlukan untuk memanipulasi interval waktu atau jarak luar biasa kecil ini.

Langkah 10: Menanti Transisi Quantum

Sebagaimana kita simak di bab 10, makhluk berakal yang menghadapi

pendinginan gradual alam semesta mereka mungkin harus berpikir secara lebih lamban dan berhibernasi selama periode waktu yang panjang. Proses memperlamban laju berpikir ini dapat berlanjut selama triliunan tahun, waktu yang cukup untuk terjadinya peristiwa quantum. Normalnya, kita bisa mengabaikan pembentukan spontan gelembung alam semesta dan transisi menjadi alam semesta quantum lainnya karena merupakan peristiwa yang amat langka. Namun, di tahap 5, makhluk berakal mungkin harus berpikir begitu lamban sehingga peristiwa quantum demikian bisa menjadi relatif lumrah. Dalam waktu subjektif mereka, bagi mereka, laju berpikir mereka terasa normal-normal saja, meskipun skala waktu aktualnya begitu panjang sampai-sampai peristiwa quantum menjadi kejadian normal.

Jika demikian, makhluk semacam itu hanya harus menanti sampai *wormhole* muncul dan transisi quantum terjadi dalam rangka melarikan diri ke alam semesta lain. (Walaupun makhluk semacam itu melihat transisi quantum sebagai sesuatu yang lumrah, permasalahannya di sini adalah bahwa peristiwa quantum ini sama sekali tidak dapat diprediksi; akan sulit untuk beralih ke alam semesta lain jika seseorang tidak tahu persis kapan gerbang terbuka atau ke mana itu menuju. Makhluk-makhluk ini mungkin harus menangkap kesempatan untuk meninggalkan alam semesta segera setelah *wormhole* terbuka, sebelum mereka mencoba menganalisis sifatnya secara mendalam.)

Langkah 11: Harapan Terakhir

Untuk sejenak asumsikan bahwa seluruh eksperimen *wormhole* dan *black hole* di masa mendatang menghadapi permasalahan yang tak bisa ditanggulangi: bahwa satu-satunya *wormhole* yang stabil adalah *wormhole* berukuran mikroskopis hingga subatom. Asumsikan pula bahwa perjalanan sungguhan melewati *wormhole* dapat menimbulkan tekanan berat terhadap tubuh kita, sekalipun dalam kapal pelindung. Sejumlah tantangan, seperti gaya tidal intens, medan radiasi, puing jatuh yang masuk, akan terbukti mematikan. Jika demikian keadaannya, makhluk berakal di masa depan di alam semesta kita hanya akan punya satu opsi tersisa: menyuntikkan cukup informasi ke alam semesta baru untuk mereproduksi peradaban kita di sisi lain *wormhole*.

Secara alami, ketika organisme hidup dihadapkan dengan lingkungan tak ramah, terkadang mereka menemukan metode cerdik untuk bertahan. Beberapa mamalia berhibernasi. Beberapa ikan dan katak mempunyai bahan kimiawi mirip antibeku yang beredar dalam cairan jasmani mereka yang memungkinkan mereka untuk tetap hidup dalam kebekuan. Fungi menghindari kepunahan dengan berubah menjadi spora. Demikian halnya, manusia harus menemukan cara untuk mengganti eksistensi fisika mereka demi bertahan dalam perjalanan menuju alam semesta lain.

Pikirkan pohon ek, yang menaburkan benih-benih kecil ke semua arah. Benih-benih itu (a) kecil, lenting, dan kompak; (b) memuat seluruh kandungan DNA pohon; (c) dirancang untuk menempuh jarak

tertentu dari pohon induk; (d) memuat cukup makanan untuk memulai proses regenerasi di daratan jauh; (e) tumbuh dengan mengkonsumsi nutrien dan energi dari tanah dan hidup dari daratan baru. Demikian halnya, sebuah peradaban bisa mencoba meniru alam dengan mengirim "benih" lewat *wormhole*, menggunakan nanoteknologi tercanggih yang tersedia miliaran tahun dari sekarang, untuk menyalin tiap-tiap sifat penting ini.

Sebagaimana dikatakan oleh Stephen Hawking, "Kelihatannya...-teori quantum memperkenankan perjalanan waktu pada basis mikroskopis." Bila Hawking benar, anggota-anggota sebuah peradaban maju bisa memutuskan untuk mengganti jasad fisik mereka menjadi sesuatu yang dapat bertahan dalam perjalanan berat ke masa lalu atau ke alam semesta lain, menggabungkan karbon dengan silikon dan menurunkan kesadaran mereka menjadi informasi belaka. Menurut analisis terakhir, tubuh berbasis karbon kita kemungkinan terlalu rapuh untuk memikul penderitaan fisik dalam perjalanan sebesar ini. Jauh di masa depan, kita mungkin mampu menggabungkan kesadaran kita dengan robot ciptaan kita, menggunakan rekayasa DNA canggih, nanoteknologi, dan robotika. Ini mungkin terdengar ganjil menurut standar masa kini, tapi sebuah peradaban yang eksis miliaran sampai triliunan tahun di masa depan menganggapnya sebagai satu-satunya cara untuk bertahan.

Mereka mungkin harus menggabungkan otak dan kepribadian mereka persis menjadi mesin. Ini bisa dilakukan dengan beberapa cara. Seseorang bisa menciptakan software canggih yang mampu

menduplikasi semua proses berpikir kita, sehingga memiliki kepribadian yang identik dengan punya kita. Yang lebih ambisius adalah program yang dianjurkan oleh Hans Moravec dari Universitas Carnegie-Mellon. Dia mengklaim bahwa, jauh di masa depan, kita mungkin sanggup mereproduksi arsitektur otak kita pada transistor silikon, syaraf demi syaraf. Tiap-tiap sambungan syaraf di otak akan digantikan oleh transistor yang menduplikasi fungsi syaraf ke dalam sebuah robot.

Karena gaya tidal dan medan radiasi kemungkinan besar akan kuat, peradaban masa depan harus mengangkut bahan bakar, perisai, dan nutrien dalam jumlah sangat minimal yang diperlukan untuk mereproduksi spesies kita di sisi lain *wormhole*. Menggunakan nanoteknologi, kita dapat mengirim rantai mikroskopis di dalam perangkat yang tak selebar sel untuk menyeberangi *wormhole*.

Jika *wormhole*-nya sangat kecil, ilmuwan harus mengirim nanotube besar berskala atom yang terbuat dari masing-masing atom, di-*encode* dengan informasi dalam jumlah besar yang cukup untuk mereproduksi seluruh spesies di sisi lain *wormhole*. Jika *wormhole* hanya seukuran partikel subatom, ilmuwan harus menemukan cara untuk mengirim nukleus—menyeberangi *wormhole*—yang akan merenggut elektron di sisi lain *wormhole* dan merekonstruksi dirinya menjadi atom dan molekul. Jika *wormhole* jauh lebih kecil lagi dari itu, barangkali sinar laser yang terbuat dari sinar X atau sinar gamma bisa dipakai untuk mengirim kode rumit melewati *wormhole*, memberi instruksi tentang bagaimana merekonstruksi peradaban di sisi lain.

Tujuan pentransferan semacam itu adalah untuk mengkonstruksi "nanobot" mikroskopis di sisi lain *wormhole*, di mana misi "nanobot" tersebut adalah menemukan lingkungan cocok untuk meregenerasi peradaban kita. Karena dikonstruksi pada skala atom, ia tidak memerlukan roket pendorong yang besar atau bahan bakar yang banyak untuk menemukan planet yang cocok. Kenyataannya, ia tanpa susah payah dapat mendekati kecepatan cahaya sebab untuk mengirim partikel subatom mendekati kecepatan cahaya dengan memanfaatkan medan listrik adalah sesuatu yang relatif mudah. Di samping itu, ia tidak membutuhkan penyokong hidup atau kepingan hardware janggal lainnya, karena kandungan utama nanobot tersebut adalah informasi semata yang diperlukan untuk meregenerasi ras.

Sekali nanobot menemukan planet baru, ia akan mendirikan pabrik besar menggunakan bahan mentah yang tersedia di planet tersebut untuk membangun banyak replika dirinya dan membuat laboratorium pengkloningan besar. Sekuens DNA yang diperlukan bisa diproduksi di laboratorium ini dan kemudian disuntikkan ke dalam sel untuk memulai proses regenerasi seluruh organisme dan akhirnya seluruh spesies. Sel-sel di lab ini lalu akan tumbuh menjadi makhluk yang dewasa sepenuhnya, di mana ingatan dan kepribadian manusia asli dimasukkan ke dalam otaknya.

Sedikit banyak, proses ini mirip dengan penyuntikan DNA kita (kandungan informasi total peradaban tipe III atau lebih) ke dalam "sel telur", memuat instruksi genetik yang mampu mereproduksi embrio di sisi lain *wormhole*. "Telur yang difertilisasi" berbentuk

kompak, kokoh, dan *mobile*, namun memuat seluruh kumpulan informasi yang dibutuhkan untuk mereproduksi peradaban tipe III. Sel manusia tipikal hanya memuat 30.000 gen, tersusun pada 3 miliar pasangan dasar DNA, tapi kepingan ringkas informasi ini cukup untuk mereproduksi manusia, memanfaatkan sumber daya yang ditemukan di luar sperma (makanan bergizi yang disediakan oleh ibu). Demikian halnya, "telur kosmik" akan tersusun dari seluruh informasi yang diperlukan untuk meregenerasi sebuah peradaban maju; sumber daya untuk melakukan ini (bahan mentah, pelarut, logam, dan seterusnya) akan ditemukan di sisi lain *wormhole*. Dengan cara ini, sebuah peradaban maju, seperti peradaban tipe III Q, akan mampu menggunakan teknologi hebat mereka untuk mengirim cukup informasi (sekitar 10^{24} bit informasi) menyeberangi *wormhole* yang cukup untuk mereproduksi peradaban mereka di sisi lain.

Perkenankan saya tekankan bahwa setiap langkah yang telah saya sebutkan dalam proses ini sangat jauh dari kemampuan masa kini sehingga pasti terdengar seperti sains fiksi. Tapi miliaran tahun di masa depan, bagi peradaban tipe III Q yang menghadapi kepunahan, ini mungkin merupakan satu-satunya jalan untuk menyelamatkan diri. Sudah pasti, tak ada dalam hukum fisika atau biologi yang mencegah ini terjadi. Maksud saya adalah bahwa kematian penghabisan alam semesta kita mungkin tidak harus berarti kematian makhluk berakal. Tentu saja, jika kemampuan untuk mentransfer makhluk berakal dari satu alam semesta ke alam semesta lainnya adalah mungkin, itu menyisakan kemungkinan bahwa bentuk

kehidupan dari alam semesta lain, yang menghadapi *big freeze*-nya sendiri, bisa mencoba untuk membuat lubang menuju suatu daerah jauh di alam semesta kita, di mana kondisinya lebih hangat dan lebih ramah.

Dengan kata lain, *unified field theory*, bukan sekadar merupakan keingintahuan elegan yang tak berguna, mungkin pada akhirnya menyediakan cetakbiru untuk keberlangsungan makhluk berakal di alam semesta.

Bab 12
Di Luar Multiverse

Bibel mengajari kita bagaimana untuk berjalan ke surga, bukan bagaimana surga berjalan.

—Kardinal Baronius,
diulang oleh Galileo dalam pengadilan dirinya

Mengapa ada sesuatu, daripada tidak ada? Kegelisahan yang membuat jam metafisika terus berjalan adalah pemikiran bahwa ketidakeksisan dunia sama mungkinnya dengan keeksisannya.

—William James

Pengalaman terindah yang bisa kita miliki adalah misteri. Ini merupakan emosi fundamental yang menjadi tempat lahir seni dan sains sejati. Barangsiapa yang tidak mengetahuinya dan tidak lagi ingin tahu, tidak lagi terheran, sama halnya dengan orang mati, dan penglihatannya kabur.

—Albert Einstein

Pada 1863, Thomas H. Huxley menulis, "Pertanyaan di atas semua pertanyaan manusia, persoalan yang berada di balik semuanya

dan yang lebih menarik dari semuanya, adalah mengenai penetapan kedudukan manusia di Alam dan hubungannya dengan Kosmos."

Huxley dikenal sebagai "anjingnya Darwin", galak membela teori evolusi terhadap Inggris Victoria yang amat konservatif. Masyarakat Inggris memandang manusia berdiri secara bangga di pusat penciptaan; tak hanya tata surya merupakan pusat alam semesta, manusia juga merupakan pencapaian puncak ciptaan Tuhan, puncak karya tangan suci Tuhan. Tuhan menciptakan kita dalam gambaran sejati Diri-Nya.

Dengan menantang keortodoksan agama ini secara terbuka, Huxley harus membela teori Darwin dari salvo yang dilancarkan oleh kekuatan agama, alhasil membantu membangun pemahaman yang lebih ilmiah atas peranan kita dalam pohon kehidupan. Hari ini, kita akui, di antara raksasa-raksasa sains, Newton, Einstein, dan Darwin telah mengerjakan pekerjaan berguna dalam membantu menetapkan kedudukan sah kita di kosmos.

Masing-masing mereka bergulat dengan implikasi teologis dan filosofis karyanya dalam menetapkan peran kita di alam semesta. Dalam kesimpulan *Principia*, Newton menyatakan, "Sistem matahari, planet, dan komet terindah hanya bisa berawal dari nasehat dan kendali Entitas cerdas dan berkuasa." Jika Newton menemukan hukum gerak, maka pasti terdapat perumus hukum ilahiah.

Einstein, juga, yakin akan eksistensi Entitas yang dia sebut Old One, tapi Entitas yang tidak ikut campur dalam urusan manusia. Cita-citanya, bukannya mengagungkan Tuhan, adalah "membaca Pikiran

Tuhan". Dia mengatakan, "Saya ingin tahu bagaimana Tuhan menciptakan dunia ini. Saya tidak tertarik pada fenomena ini dan itu. Saya ingin mengetahui pikiran Tuhan. Sisanya hanyalah rincian." Einstein menjustifikasi perhatian kuatnya dalam masalah teologi ini dengan menyimpulkan, "Sains tanpa agama adalah pincang. Tapi agama tanpa sains adalah buta."

Sedangkan, Darwin terpecah dalam pertanyaan soal peran manusia di alam semesta. Walaupun dia didiskreditkan sebagai orang yang melengserkan manusia dari pusat alam semesta biologis, dia mengakui dalam otobiografinya mengenai "kesulitan ekstrim atau kemustahilan untuk memahami alam semesta yang sangat besar dan menakjubkan ini, termasuk manusia dengan kemampuannya untuk menatap jauh ke belakang dan jauh ke masa depan, sebagai hasil dari untung-untungan buta atau keharusan." Dia mengutarakan kepada seorang teman, "Teologi saya sama sekali kacau-balau."

Sayangnya, "penetapan kedudukan manusia di Alam dan hubungannya dengan Kosmos" penuh dengan bahaya, terutama bagi mereka yang berani menantang dogma kaku keortodoksan yang berkuasa. Bukan kebetulan bahwa Nicolaus Copernicus menulis buku perintisnya, *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (*On the Revolutions of the Celestial Orbs*), di atas ranjang kematiannya pada 1543, tak tersentuh Inkuisisi mengerikan. Juga tak pelak lagi bahwa Galileo, yang telah dilindungi begitu lama oleh pelindung berpengaruhnya dalam keluarga Medici, akhirnya mendapat murka Vatikan lantaran mempopulerkan sebuah instrumen yang menyingkap alam semesta

yang begitu berkontradiksi nyata dengan doktrin gereja: teleskop.

Campuran sains, agama, dan filsafat memang merupakan ramuan yang kuat, begitu mudah menguap, sampai-sampai filsuf besar Giordano Bruno dibakar di tiang pembakaran pada tahun 1600 di jalanan Roma lantaran menolak menanggalkan keyakinannya bahwa terdapat planet dalam jumlah tak terhingga di angkasa, didiami oleh makhluk hidup dalam jumlah tak terhingga. Dia menulis, "Dengan ini kemuliaan Tuhan bertambah besar dan keagungan kerajaan-Nya termanifestasi; Dia diagungkan bukan di satu matahari, melainkan di matahari yang tak terbilang; bukan di satu bumi, bukan di satu dunia, melainkan di ribuan ribuan, saya katakan di dunia yang tak terhingga."

Dosa Galileo dan Bruno bukanlah karena mereka berani meramalkan hukum langit; dosa sejati mereka adalah karena mereka melengserkan manusia dari kedudukan mulianya di pusat alam semesta. Perlu lebih dari 350 tahun, sampai tahun 1992, bagi Vatikan untuk menyampaikan permintaan maaf terlambat kepada Galileo. Tak ada permintaan maaf yang pernah disampaikan kepada Bruno.

Perspektif Sejarah

Sejak Galileo, serangkaian revolusi telah menggulingkan konsepsi kita tentang alam semesta dan peran kita di dalamnya. Selama Abad Pertengahan, alam semesta dilihat sebagai tempat yang gelap dan menakutkan. Bumi seperti panggung kecil nan flat, penuh penyimpangan dan dosa, dilingkungi oleh bidang angkasa misterius di

mana pertanda-pertanda sepeti komet dapat menakutkan raja dan juga petani. Dan jika kita kurang memuji Tuhan dan gereja, kita akan menghadapi murka kritikus teater, anggota Inkuisisi yang merasa benar sendiri, dan instrumen persuasi mereka yang mengerikan.

Newton dan Einstein membebaskan kita dari ketakhayulan dan mistisisme masa lalu. Newton memberi kita hukum mekanis akurat yang memandu semua benda angkasa, termasuk planet kita. Nyatanya hukum tersebut begitu akurat, sehingga manusia menjadi burung beo belaka yang membacakan naskah mereka. Einstein merevolusi cara kita memandang panggung kehidupan. Tak hanya mustahil untuk menetapkan ukuran seragam atas waktu dan ruang, panggungnya sendiri melengkung. Tak hanya panggung itu digantikan oleh tilam karet yang meregang, ia juga mengembang.

Revolusi quantum memberi kita gambaran yang lebih ganjil atas dunia. Di satu sisi, keruntuhan determinisme mengandung arti bahwa boneka-boneka diperkenankan untuk memutus benang pengendali dan membaca sendiri naskah mereka. Kehendak bebas telah dikembalikan, tapi ada harganya: hasil yang tak pasti dan berlipat-lipat. Ini artinya para aktor tidak bisa berada di dua tempat pada waktu yang sama dan bisa menghilang dan muncul kembali. Jadinya mustahil untuk memberitahu pasti di mana seorang aktor berada ketika di atas panggung atau waktunya.

Kini, konsep multiverse telah memberi kita pergeseran paradigma lain, di mana kata "alam semesta" (*universe*) sendiri bisa menjadi usang. Dengan multiverse, terdapat panggung-panggung paralel, satu

di atas yang lainnya, dengan terowongan tersembunyi dan pintu kolong yang menghubungkannya. Panggung-panggung, kenyataannya, melahirkan panggung lain, dalam proses genesis/pembentukan tiada akhir. Di tiap-tiap panggung, hukum fisika baru muncul. Mungkin hanya di beberapa panggung ini syarat untuk kehidupan dan kesadaran dipenuhi.

Hari ini, kita adalah aktor yang hidup di babak 1, di permulaan eksplorasi keajaiban kosmik tahap ini. Di babak 2, jika kita tidak menghancurkan planet kita lewat peperangan atau polusi, kita mungkin bisa meninggalkan Bumi dan menjelajahi bintang-bintang dan benda angkasa lainnya. Tapi kita kini menjadi sadar bahwa terdapat adegan penghabisan, babak 3, ketika sandiwara berakhir, dan semua aktor binasa. Di babak 3, panggung menjadi begitu dingin sehingga kehidupan menjadi mustahil. Satu-satunya kemungkinan jalan keselamatan adalah meninggalkan panggung sepenuhnya via pintu kolong dan memulai dari awal lagi dengan sandiwara dan panggung baru.

Prinsip Copernican vs. Prinsip Antropik

Jelas, dalam peralihan dari mistisisme Abad Pertengahan menuju fisika quantum masa kini, peran kita, kedudukan kita di alam semesta, telah bergeser secara dramatis dengan tiap-tiap revolusi ilmiah. Dunia kita sedang mengembang secara eksponensial, memaksa kita mengubah konsepsi tentang diri kita sendiri. Saat saya memandang kemajuan bersejarah ini, terkadang saya diliputi oleh dua perasaan

kontradiktif, seraya menatap bintang yang kelihatannya tak terbatas di cakrawala angkasa atau merenungkan bentuk kehidupan di Bumi yang berlimpah. Di satu sisi, saya merasa kerdil oleh luasnya alam semesta. Ketika merenungkan perluasan hampa dan besar alam semesta, Blaise Pascal suatu kali menulis, "Keheningan abadi ruang tak terhingga itu membuat saya takut." Di sisi lain, mau tak mau saya terpesona oleh keanekaragaman megah kehidupan serta kompleksitas indah eksistensi biologis kita.

Hari ini, tatkala mendekati persoalan penetapan ilmiah peranan kita di alam semesta, sedikit-banyak terdapat dua sudut pandang filosofis ekstrim yang yang terepresentasikan di komunitas ilmiah: prinsip Copernican dan prinsip antropik.

Prinsip Copernican menyatakan bahwa tidak ada yang istimewa terkait kedudukan kita di alam semesta. (Beberapa pelawak menjuluki ini sebagai prinsip medioker/biasa.) Sampai sekarang, setiap penemuan astronomis terlihat membenarkan sudut pandang ini. Tak hanya Copernicus menggusur Bumi dari pusat alam semesta, Hubble memindahkan galaksi Bima Sakti seluruhnya dari pusat alam semesta, memberi kita alam semesta mengembang berisi miliaran galaksi. Penemuan mutakhir *dark matter* dan *dark energy* menggaris-bawahi fakta bahwa unsur-unsur tinggi kimiawi yang menyusun tubuh kita hanya mencakup 0,03% kandungan total materi/energi alam semesta. Dengan teori inflasi, kita harus merenungkan fakta bahwa *visible universe* adalah seperti sebutir pasir yang melekat di alam semesta flat yang jauh lebih besar, dan bahwa alam semesta ini sendiri mungkin

terus-menerus menunaskan alam semesta-alam semesta baru. Dan terakhir, jika teori-M terbukti berhasil, kita harus menghadapi kemungkinan bahwa dimensionalitas ruang dan waktu familiar kita pasti mengembang menjadi sebelas dimensi. Bukan hanya kita telah digusur dari pusat alam semesta, kita mungkin akan mendapati bahwa *visible universe* tak lain hanyalah pecahan kecil multiverse yang jauh lebih besar.

Dihadapkan dengan besarnya kenyataan ini, saya teringat akan syair Stephen Crane, yang pernah menulis,

> *Seseorang berkata kepada alam semesta:*
> *"Tuan, aku eksis!"*
> *"Bagaimanapun," jawab alam semesta,*
> *"fakta tersebut tidak menimbulkan*
> *rasa kewajiban pada diriku."*

(Saya teringat pada lelucon sains fiksi karangan Douglas Adam, *Hitchhiker's Guide to the Galaxy*, di mana dalam fiksi tersebut terdapat sebuah perangkat bernama Total Perspective Vortex, yang dijamin mengubah orang waras menjadi gila. Di dalam *chamber* terdapat peta alam semesta dengan bacaan berbentuk panah kecil, "Kau ada di sini.")

Tapi pada ekstrim lain, kita mempunyai prinsip antropik, yang menyadarkan kita bahwa sederetan "kebetulan" ajaib membuat kesadaran di alam semesta tiga-dimensi kita menjadi mungkin. Terdapat pita parameter sempit yang membuat makhluk berakal menjadi kenyataan, dan kita kebetulan tumbuh subur di pita ini.

Stabilitas proton, ukuran bintang, eksistensi unsur tinggi, dan seterusnya, semuanya terlihat disetel halus untuk memperkenankan bentuk kehidupan dan kesadaran kompleks. Seseorang dapat mendebat apakah keadaan kebetulan ini merupakan rancangan atau kebetulan, tapi tak ada yang bisa membantah penyetelan rumit yang diperlukan untuk memungkinkan kita.

Stephen Hawking mengemukakan, "Jika laju perluasan satu detik setelah *big bang* lebih kecil sebesar 1 bagian dalam 100.000.000.000, [alam semesta] akan kolaps kembali sebelum ia mencapai ukurannya yang sekarang... Kemungkinan alam semesta seperti punya kita untuk tidak muncul dari sesuatu seperti *big bang* adalah besar sekali. Saya pikir terdapat implikasi relijius yang nyata."

Kita sering gagal memahami betapa berharganya kehidupan dan kesadaran itu sebenarnya. Kita lupa bahwa sesuatu seremeh air merupakan salah satu zat paling bernilai di alam semesta, bahwa hanya Bumi (dan mungkin Europa, bulannya Yupiter) yang mempunyai air dalam jumlah tertentu di tata surya, bahkan mungkin di sektor galaksi ini. Mungkin juga bahwa otak manusia merupakan objek paling kompleks yang alam ciptakan di tata surya, barangkali hingga bintang terdekat. Ketika kita memandang gambar-gambar jernih tanah Mars atau Venus yang tak berkehidupan, kita tertampar oleh fakta bahwa permukaan-permukaan itu sama sekali tandus dari kota dan cahaya atau bahkan bahan kimiawi kompleks organis kehidupan. Tak terhitung dunia yang eksis jauh di luar angkasa tidak memiliki kehidupan, kurang-lebih tidak memiliki makhluk berakal. Itu

semestinya membuat kita mengerti betapa halusnya kehidupan ini, dan betapa ajaibnya ia tumbuh subur di Bumi.

Prinsip Copernican dan prinsip antropik dalam beberapa hal merupakan persepektif bertentangan yang menggolongkan ekstrim-ekstrim eksistensi kita dan membantu kita memahami peranan sejati kita di alam semesta. Sementara prinsip Copernican memaksa kita untuk menghadapi besarnya alam semesta, dan barangkali multiverse, prinsip antropik memaksa kita untuk menyadari betapa langkanya kehidupan dan kasadaran itu sebenarnya.

Tapi pada akhirnya, perdebatan antara prinsip Copernican dan prinsip antropik tidak dapat menetapkan peranan kita di alam semesta kecuali jika kita memandang persoalan ini dari perspektif yang lebih besar lagi, dari sudut pandang teori quantum.

Makna Quantum

Dunia sains quantum memberikan banyak keterangan mengenai persoalan peran kita di alam semesta, tapi dari sudut pandang berbeda. Jika seseorang menganut interpretasi Wigner atas persoalan kucing Schrödinger, maka kita harus memperhatikan peran kesadaran di mana-mana. Rantai pengamat yang tak berujung, masing-masing menatap pengamat sebelumnya, akhirnya membawa kepada pengamat kosmik, mungkin Tuhan sendiri. Dalam gambaran ini, alam semesta eksis lantaran ada Tuhan yang mengamatinya. Dan jika interpretasi Wheeler benar, maka seluruh alam semesta didominasi oleh informasi dan kesadaran. Menurut gambarannya, kesadaran

adalah kekuatan dominan yang menentukan sifat eksistensi.

Sudut pandang Wigner, pada gilirannya, menuntun Ronnie Knox menulis syair tentang pertemuan antara seorang skeptik dan Tuhan, merenungkan apakah sebuah pohon eksis di halaman berkeliling tembok apabila tak ada seorang pun di sana yang mengamatinya:

Suatu kali seseorang berkata, "Tuhan
pasti luar biasa keheranan
jika pohon ini ternyata
terus ada
padahal tak ada siapapun di Pekarangan."

Seorang pelawak anonim kemudian menulis jawaban berikut:

Tuan yang terhormat, takjub Anda mengherankan
Aku selalu berada di Pekarangan
dan itulah mengapa pohonnya
akan terus ada,
sebab diamati oleh Sahabat setia Anda—Tuhan

Dengan kata lain, pepohonan eksis di halaman berkeliling tembok karena seorang pengamat quantum senantiasa di sana untuk mengkolapskan fungsi gelombangnya—Tuhan sendiri.

Interpretasi Wigner menempatkan persoalan kesadaran di pusat fondasi fisika. Wigner menggemakan kata-kata astronom besar James Jeans, yang pernah menulis, "Lima puluh tahun silam, alam semesta umumnya dianggap sebagai mesin... Ketika kita sampai kepada perbedaan ukuran yang besar di setiap arah—baik menuju kosmos

secara keseluruhan, ataupun menuju lubuk dalam atom—interpretasi mekanis atas Alam gagal. Kita sampai kepada entitas-entitas dan fenomena-fenomena yang sama sekali tidak mekanis. Bagi saya, mereka lebih mengisyaratkan proses mental ketimbang mekanis; alam semesta lebih mirip pikiran hebat daripada mesin hebat."

Interpretasi ini mungkin mengambil bentuk terambisiusnya dalam teori Wheeler, *it from bit*. "Tak hanya kita beradaptasi dengan alam semesta. Alam semesta juga beradaptasi dengan kita." Dengan kata lain, sedikit-banyak kita menciptakan realitas kita sendiri dengan melakukan pengamatan. Dia menyebut ini sebagai "Genesis lewat pengamatan". Wheeler mengklaim bahwa kita hidup di "alam semesta partisipan".

Kata-kata yang sama digemakan oleh peraih Nobel, biolog George Wald, yang menulis, "Akan sangat malang menjadi atom di alam semesta tanpa fisikawan. Dan fisikawan sendiri terbuat dari atom. Fisikawan adalah cara atom mengenal atom." Pendeta Unitarian, Gary Kowalski, meringkas keyakinan ini dengan mengatakan, "Alam semesta, bisa dikatakan, eksis untuk memuji dirinya sendiri dan senang akan keindahannya sendiri. Dan jika ras manusia merupakan satu aspek kosmos yang tumbuh menuju kesadarannya sendiri, kegunaan kita pasti adalah untuk memelihara dan menjaga dunia kita serta mempelajarinya, bukan untuk menjarah atau merusak apa-apa yang telah menghabiskan waktu begitu panjang untuk dihasilkan."

Dalam garis pemikiran ini, alam semesta mempunyai satu arti: *menghasilkan makhluk berperasaan seperti kita yang dapat mengamati-*

nya supaya eksis. Menurut perspektif ini, eksistensi alam semesta tergantung pada kemampuannya untuk menciptakan makhluk berakal yang bisa mengamatinya dan karenanya mengkolapskan fungsi gelombangnya.

Seseorang boleh merasa nyaman dengan interpretasi Wigner atas teori quantum. Namun, terdapat interpretasi lain, interpretasi *many-worlds*, yang memberi kita konsepsi yang sama sekali berbeda tentang peran manusia di alam semesta. Dalam interpretasi *many-worlds*, kucing Schrödinger bisa mati dan hidup secara bersamaan, karena alam semesta sendiri telah pecah menjadi dua alam semesta terpisah.

Makna Dalam Multiverse

Mudah sekali untuk tersesat di alam semesta yang banyak tak terhingga ala teori *many-worlds*. Implikasi moral alam semesta quantum paralel ini digali dalam cerita pendek karangan Larry Niven, *All the Myriad Ways*. Dalam cerita tersebut, Detektif-Letnan Gene Trimble menginvestigasi sejumlah peristiwa bunuh diri misterius. Mendadak, di seluruh kota, orang-orang yang tak memiliki riwayat masalah mental melompat dari jembatan, mengeluarkan otak mereka, atau bahkan melakukan pembunuhan masal. Misteri semakin mendalam saat Ambrose Harmon, miliuner pendiri Crosstime Corporation, lompat dari lantai 36 apartemen mewahnya usai memenangkan 500 dolar di meja poker. Kaya, berpengaruh, dan banyak koneksi, dia punya segalanya untuk diharapkan; aksi bunuh dirinya tidak dapat dimengerti. Tapi Trimble akhirnya menemukan

sebuah pola. Duapuluh satu persen pilot Crosstime Corporation melakukan bunuh diri; betul, bunuh diri itu dimulai sebulan setelah pendirian Crosstime.

Menggali lebih dalam, dia menemukan bahwa Harmon mewarisi kekayaan besarnya dari kakek moyangnya dan menghamburkannya untuk menyokong tujuan yang gegabah. Dia mungkin kehilangan seluruh kekayaannya, tapi untuk satu pertaruhan yang memberi hasil. Dia mengumpulkan beberapa fisikawan, insinyur, dan filsuf untuk menyelidiki kemungkinan alur waktu paralel. Akhirnya, mereka menemukan sebuah kendaraan yang bisa memasuki alur waktu baru, dan pilotnya membawa balik penemuan baru dari Confederate States of America secara cepat. Crosstime kemudian mengadakan ratusan misi ke alur waktu paralel, di mana mereka menemukan penemuan baru yang bisa dibawa balik dan dipatenkan. Tak lama, Crosstime menjadi perusahaan miliuner, memegang paten atas penemuan-penemuan kelas dunia dan paling penting di masa kita. Seolah-olah Crosstime akan menjadi perusahaan paling sukses di zamannya, dengan Harmon yang memegang pimpinan.

Masing-masing alur waktu yang mereka temukan adalah berbeda. Mereka menemukan Catholic Empire, Amerindian America, Imperial Russia, dan banyak dunia radioaktif mati yang berakhir dalam perang nuklir. Tapi akhirnya, mereka menemukan sesuatu yang amat menggelisahkan: salinan diri mereka, menjalankan kehidupan yang hampir identik, tapi dengan corak yang ganjil. Di dunia-dunia ini, tak peduli apa pun yang mereka lakukan, segala sesuatu bisa terjadi: tak

peduli seberapa keras mereka bekerja, mereka bisa merealisasikan mimpi terfantastik mereka atau menjalani mimpi buruk mereka yang paling memilukan. Apa pun yang mereka lakukan, mereka sukses di beberapa alam semesta dan gagal sama sekali di alam semesta lainnya. Tak peduli apa pun yang mereka lakukan, terdapat salinan diri tak terhingga yang membuat keputusan berlawanan dan menuai semua kemungkinan konsekuensi. Mengapa tidak menjadi perampok bank saja jika, di suatu alam semesta, Anda bisa berjalan bebas tanpa hukuman?

Trimble berpikir, "Tidak ada kemujuran di mana pun. Setiap keputusan dibuat dua jalan. Untuk setiap pilihan bijak, Anda mengeluarkan darah dari jantung Anda, Anda membuat semua pilihan lain juga. Dan begitulah itu berlangsung, semuanya melewati sejarah." Keputusasaan mendalam melanda Trimble tatkala dia mencapai kesadaran yang memilukan: Di sebuah alam semesta di mana segalanya adalah mungkin [terjadi], tak ada yang memiliki arti moral. Dia menjadi korban keputusasaan, menyadari bahwa kita pada akhirnya tidak mempunyai kendali atas takdir kita, bahwa tak peduli keputusan apa pun yang kita buat, hasilnya sama saja.

Akhirnya, dia memutuskan untuk mengikuti tindakan Harmon. Dia mencabut senapan dan mengarahkannya ke kepalanya. Tapi saat dia menarik pemicu pun, terdapat alam semesta dalam jumlah tak terhingga di mana senapan meleset, pelurunya mengenai atap, pelurunya membunuh sang detektif, dan sebagainya. Keputusan akhir Trimble diperankan dalam cara tak terhingga di alam semesta

berjumlah tak terhingga.

Saat kita membayangkan multiverse quantum, kita dihadapkan, sebagaimana Trimble dalam cerita tersebut, dengan kemungkinan bahwa, walaupun diri paralel kita yang hidup di alam semesta quantum berbeda mempunyai kode genetik yang persis sama, pada titik waktu krusial kehidupan, kesempatan kita, penasehat kita, dan mimpi kita mungkin membawa kita menempuh jalur berlainan, menuju sejarah hidup dan takdir berlainan.

Satu bentuk dilema ini sebetulnya hampir ada pada kita. Ini hanya soal waktu, mungkin beberapa dekade lagi, sebelum pengkloningan genetik manusia menjadi fakta lumrah kehidupan. Walaupun mengkloning manusia amat sulit (nyatanya, tak ada seorang pun yang telah berhasil mengkloning primata sepenuhnya, apalagi manusia) dan persoalan etisnya sangat menggelisahkan, tak bisa dielakkan bahwa pada suatu waktu itu akan terjadi. Dan ketika itu terjadi, muncul pertanyaan: apakah klon kita mempunyai jiwa? Apakah kita bertanggung jawab atas perbuatan klon kita? Di sebuah alam semesta quantum, kita mempunyai klon quantum yang tak terhingga. Karena beberapa klon quantum kita dapat melakukan perbuatan jahat, lantas apakah kita bertanggung jawab atas mereka? Apakah jiwa kita menderita atas pelanggaran klon quantum kita?

Ada resolusi untuk krisis eksistensi quantum ini. Jika kita melihat sepintas ke multiverse berisi dunia-dunia yang tak terhingga, kita mungkin diliputi oleh keacakan takdir yang mempusingkan, tapi di tiap-tiap dunia aturan logis kausalitas masih berlaku istimewa. Dalam

teori multiverse yang diajukan oleh para ilmuwan, masing-masing alam semesta mematuhi hukum mirip hukum Newtonian pada skala mikroskopis, jadi kita bisa hidup dengan nyaman, tahu bahwa perbuatan kita mempunyai konsekuensi yang sebagian besar dapat diprediksikan. Di masing-masing alam semesta, hukum kausalitas, rata-rata, berlaku secara kaku. Di masing-masing alam semesta, bila kita melakukan kejahatan, maka kemungkinan besar kita akan masuk penjara. Kita bisa menjalankan urusan kita dengan bahagia tanpa menyadari semua realitas paralel yang koeksis bersama kita.

Ini mengingatkan saya kepada kisah meragukan yang terkadang diceritakan oleh fisikawan kepada satu sama lain. Suatu hari, seorang fisikawan dari Rusia dibawa ke Las Vegas. Dia terpesona oleh kemewahan dan pesta-pora yang ditawarkan *sin city* tersebut. Dia segera pergi ke meja judi dan menaruh semua uangnya di taruhan pertama. Saat dia diberitahu bahwa itu merupakan strategi judi yang bodoh, bahwa strateginya bertentangan dengan hukum matematika dan probabilitas, dia menjawab, "Ya, semua itu benar, tapi di satu alam semesta quantum, saya akan kaya!" Fisikawan Rusia tersebut mungkin benar dan di suatu dunia paralel mungkin sedang menikmati kekayaan melampaui imajinasinya. Tapi di alam semesta ini, dia kalah dan bokék. Dan dia harus menanggung konsekuensinya.

Apa yang Dipikirkan Fisikawan Tentang Makna Alam Semesta

Perdebatan mengenai makna kehidupan digemparkan lebih jauh lagi

oleh pernyataan provokatif Steven Weinberg dalam bukunya, *The First Three Minutes*. Dia menulis, "Semakin alam semesta dapat dipahami, semakin pula ia tidak berarti... Upaya untuk memahami alam semesta adalah salah satu hal yang mengangkat hidup manusia sedikit di atas level sandiwara jenaka, dan memberinya suatu keanggunan tragedi." Weinberg mengakui bahwa dari semua kalimat yang dia tulis, ini merupakan kalimat yang mendatangkan respon paling sengit. Berikutnya dia menciptakan kontroversi lain dengan komentarnya, "Dengan atau tanpa agama, orang baik bisa berperilaku baik dan orang jahat bisa berbuat jahat; tapi agar orang baik berbuat jahat—itu memerlukan agama."

Weinberg rupanya mendapat kesenangan jahat tertentu dalam menimbulkan kehebohan, bermain-main terhadap pretensi orang-orang yang memeluk suatu pandangan mengenai makna kosmik alam semesta. "Selama bertahun-tahun saya berselisih riang dalam persoalan filosofis," akunya. Seperti Shakespeare, dia percaya bahwa dunia hanyalah panggung, "tapi tragedinya tidak ada di naskah; tragedinya adalah bahwa tidak ada naskah."

Weinberg mencerminkan kata-kata ilmuwan Richard Dawkins dari Oxford, seorang biolog yang menyatakan, "Di alam semesta berisi gaya-gaya fisikal buta...beberapa orang akan terluka, dan orang lain akan bernasib mujur, dan Anda tidak akan menemukan sebabnya, pun tidak keadilan. Alam semesta yang kita amati mempunyai sifat yang persis kita harapkan jika, secara hakekat, tidak ada perancangan, tidak ada maksud, tidak ada kejahatan, dan tidak ada kebaikan,

kecuali ketidakacuhan buta dan bengis."

Pada esensinya, Weinberg menaruh tantangan. Jika orang-orang percaya bahwa alam semesta mempunyai arti, lantas apa itu? Ketika para astronom mengintai keluasan kosmos, beserta lahir dan matinya bintang-bintang raksasa yang jauh lebih besar dari Matahari kita di sebuah alam semesta yang mengembang secara eksplosif selama miliaran tahun, sulit untuk memahami bagaimana semua ini bisa diatur secara akurat untuk memberi maksud kepada manusia yang tinggal di planet kecil yang beredar mengelilingi bintang suram.

Walaupun pernyataan Weinberg menimbulkan banyak kemarahan, sangat sedikit ilmuwan yang bangkit untuk menghadapinya. Tapi ketika Alan Lightman dan Roberta Brawer mewawancarai sekumpulan kosmolog terkemuka untuk bertanya apakah mereka sependapat dengan Weinberg, menariknya, hanya beberapa yang menerima penilaian muram Weinberg atas alam semesta. Salah seorang ilmuwan yang teguh berpihak kepada Weinberg adalah Sandra Faber dari Lick Observatory dan Universitas California di Santa Cruz, yang berkata, "Saya tidak percaya bumi diciptakan untuk manusia. Planet ini diciptakan oleh proses alami, dan, sebagai bagian dari keberlanjutan proses-proses alami tersebut, muncul-lah kehidupan dan makhluk berakal. Dengan cara yang sama persis, saya pikir alam semesta diciptakan dari suatu proses alami, dan kemunculan kita di situ sema sekali merupakan hasil alami hukum fisika dalam porsi kita atasnya. Yang implisit dalam pertanyaan Anda, saya duga, adalah bahwa terdapat suatu kekuatan penggerak yang

mempunyai maksud selain eksistensi manusia. Saya tidak percaya itu. Jadi, saya kira pada akhirnya saya sependapat dengan Weinberg bahwa itu sama sekali tidak berarti dari perspektif manusia."

Tapi kelompok kosmolog yang jauh lebih besar berpikir bahwa Weinberg salah, bahwa alam semesta betul-betul memiliki arti, kendati mereka tidak dapat mengartikulasikannya.

Margaret Geller, profesor di Universitas Harvard, mengatakan, "Saya kira pandangan hidup saya adalah bahwa Anda harus menjalankan hidup Anda dan itu singkat. Maksud saya adalah miliki pengalaman sekaya mungkin semampu Anda. Itulah yang saya coba lakukan. Saya sedang mencoba melakukan sesuatu yang kreatif. Saya mencoba mengedukasi masyarakat."

Dan beberapa dari mereka melihat arti pada alam semesta dalam kerja tangan Tuhan. Don Page dari Universitas Alberta, bekas mahasiswa Stephen Hawking, mengatakan, "Ya, saya ingin mengatakan bahwa pasti ada maksud. Saya tidak tahu apa semua maksud itu, tapi saya kira salah satunya adalah Tuhan menciptakan manusia agar bersahabat dengan Tuhan. Maksud yang lebih besar mungkin adalah agar ciptaan Tuhan mengagungkan Tuhan." Dia bahkan melihat kerja tangan Tuhan pada aturan abstrak fisika quantum: "Sedikit-banyak, hukum fisika terlihat analogis dengan *grammar* dan bahasa yang Tuhan pilih gunakan."

Charles Misner dari Universitas Maryland, salah seorang pelopor dalam menganalisis teori relativitas umum Einstein, menemukan kesamaan landasan dengan Page: "Perasaan saya adalah bahwa dalam

agama terdapat hal-hal yang sangat serius, seperti eksistensi Tuhan dan persaudaraan manusia, itu merupakan kebenaran serius yang suatu hari akan kita belajar pahami mungkin dengan bahasa berbeda pada skala berbeda... Jadi saya pikir terdapat kebenaran sejati di sana, dan dalam pengertian tersebut keagungan alam semesta penuh dengan makna, dan kita berhutang kehormatan dan keterkaguman kepada Penciptanya."

Persoalan Pencipta menimbulkan pertanyaan: "bisakah sains mengatakan sesuatu tentang eksistensi Tuhan? Teolog Paul Tillich pernah bilang bahwa fisikawan merupakan satu-satunya ilmuwan yang bisa mengucapkan kata "Tuhan" dan tidak merasa malu. Betul, fisikawan berdiri sendirian di antara ilmuwan dalam memecahkan salah satu pertanyaan terbesar manusia: apakah terdapat rancangan besar? Dan jika demikian, apakah ada perancang? Jalur mana yang benar untuk menuju kebenaran, akal atau wahyu?

Teori string memperkenankan kita untuk memandang partikel subatom sebagai not pada string yang bervibrasi; hukum kimia sama dengan melodi yang bisa dimainkan oleh seseorang dengan string-string ini; hukum fisika sama dengan hukum harmoni yang mengatur string-string ini; alam semesta adalah simfoni string; dan pikiran Tuhan dapat dipandang sebagai musik string yang bervibrasi ke seluruh *hyperspace*. Jika analogi ini valid, seseorang pasti mengajukan pertanyaan berikutnya: apakah ada komposernya? Apakah ada yang merancang teori untuk memperkenankan keberlimpahan alam semesta potensial yang kita jumpai dalam teori string? Bila alam

semesta adalah seperti jam yang disetel halus, adakah pembuat jam ini?

Dalam hal ini, teori string memberikan suatu keterangan mengenai pertanyaan: apakah Tuhan memiliki pilihan? Setiap kali Einstein membangun teori-teori kosmiknya, dia selalu mengajukan pertanyaan, bagaimana caranya saya menciptakan alam semesta? Dia cenderung menganut ide bahwa mungkin Tuhan tidak memiliki pilihan dalam persoalan tersebut. Teori string terlihat membenarkan pendekatan ini. Ketika kita mengkombinasikan relativitas dengan teori quantum, kita mendapatkan teori-teori yang dipenuhi cacat tersembunyi tapi fatal: divergensi yang membesar dan anomali yang merusak kesimetrian teori. Hanya dengan memasukkan kesimetrian mumpuni, divergensi dan anomali ini bisa dihilangkan, dan teori-M mempunyai kesimetrian paling mumpuni. Jadi, mungkin terdapat teori unik dan tunggal yang mematuhi semua postulat yang kita tuntut dalam sebuah teori.

Einstein, yang sering menulis panjang lebar mengenai Old One, pernah ditanya tentang Tuhan. Menurutnya, ada dua tipe tuhan. Tuhan yang pertama adalah tuhan personal, tuhan yang menjawab doa, tuhannya Ibrahim, Ishak, Musa, tuhan yang membelah laut dan melakukan mukjizat. Namun, ini bukan tuhan yang diyakini oleh sebagian besar ilmuwan.

Einstein pernah menulis bahwa dirinya mempercayai "Tuhannya Spinoza yang mengungkapkan Diri-Nya dalam harmoni segala hal yang eksis, bukan mempercayai Tuhan yang mengurus takdir dan perbuatan manusia." Tuhannya Spinoza dan Einstein adalah tuhan

harmoni, tuhan akal dan logika. Einstein menulis, "Saya tidak dapat membayangkan Tuhan yang mengganjar dan menghukum objek ciptaan-Nya... Juga tidak bisa mempercayai bahwa individu terus hidup setelah kematian raganya."

(Dalam *Inferno*-nya Dante, Lingkaran Pertama dekat gerbang menuju Neraka dihuni oleh orang-orang berkemauan dan bertemperamen baik yang gagal memeluk Yesus Kristus sepenuhnya. Di Lingkaran Pertama, Dante menemukan Plato dan Aristoteles serta pemikir besar dan tokoh ternama lainnya. Sebagaimana dikemukakan fisikawan Wilczek, "Kita menduga bahwa banyak, dan mungkin sebagian besar, ilmuwan modern akan menuju Lingkaran Pertama.") Mark Twain mungkin juga ditemukan di Lingkaran Pertama yang terkenal tersebut. Twain pernah mendefinisikan agama sebagai "meyakini apa yang menurut orang tolol tak usah diyakini."

Secara pribadi, dari sudut pandang ilmiah murni, saya pikir mungkin argumen paling kuat untuk eksistensi Tuhannya Spinoza dan Einstein datang dari teologi. Jika teori string akhirnya terkonfirmasi secara eksperimen sebagai *theory of everything*, maka kita harus bertanya dari mana persamaan-persamaannya berasal. Jika *unified field theory* sungguh-sungguh unik, sebagaimana diyakini Einstein, maka kita harus bertanya dari mana keunikan ini berasal. Fisikawan yang meyakini Tuhan ini percaya bahwa alam semesta begitu indah dan sederhana sehingga hukum tertingginya tidak mungkin hanya kebetulan. Alam semesta itu acak sama sekali atau tersusun dari elektron dan neutrino tak bernyawa, tak mampu menciptakan

kehidupan, apalagi makhluk berakal.

Jika, sebagaimana keyakinan saya dan beberapa fisikawan lain, hukum tertinggi realitas dapat dijelaskan oleh rumus yang mungkin tak lebih dari satu inchi panjangnya, maka pertanyaannya adalah, dari mana persamaan ini berasal?

Sebagaimana dikatakan oleh Martin Gardner, "Mengapa apel jatuh? Karena ada hukum gravitasi. Mengapa hukum gravitasi? Karena ada persamaan tertentu yang merupakan bagian dari teori relativitas. Seandainya suatu hari nanti fisikawan berhasil menuliskan satu persamaan tertinggi yang melahirkan semua hukum fisika, seseorang masih bisa bertanya, 'Mengapa persamaan tersebut?'"

Menciptakan Makna Kita Sendiri

Pada akhirnya, saya percaya bahwa eksistensi persamaan tunggal yang dapat menjelaskan seluruh alam semesta secara harmonis dan rapi mengimplikasikan suatu macam rancangan. Namun, saya tidak percaya bahwa rancangan ini memberi makna personal kepada manusia. Tak peduli seberapa mempesona atau elegan rumusan final fisika nantinya, itu tidak akan mengangkat jiwa miliaran manusia dan memberi mereka pemuasan emosi. Tak ada sulap dari kosmologi dan fisika yang akan memikat masyarakat dan memperkaya kehidupan spiritual mereka.

Bagi saya, makna sejati dalam kehidupan adalah bahwa kita menciptakan makna kita sendiri. Takdir kita adalah mengukir masa depan kita sendiri, ketimbang menerimanya dari suatu otoritas tinggi.

Einstein suatu kali mengakui bahwa dirinya tak berdaya memberikan hiburan kepada ratusan individu bermaksud baik yang menulis tumpukan surat untuk memintanya mengungkap makna kehidupan. Sebagaimana dikatakan oleh Alan Guth, "Mengajukan pertanyaan-pertanyaan tersebut boleh saja, tapi seseorang sebaiknya tidak berharap mendapatkan jawaban bijak dari fisikawan. Perasaan emosi saya sendiri adalah bahwa kehidupan mempunyai maksud—pada akhirnya, saya mengira bahwa maksud yang dimiliki kehidupan adalah maksud yang kita berikan kepadanya dan bukan maksud yang berasal dari suatu rancangan kosmik."

Saya percaya bahwa Sigmund Freud, dengan semua spekulasinya tentang sisi gelap pikiran bawah sadar, mendekati kebenaran ketika dia mengatakan bahwa yang memberi stabilitas dan makna kepada pikiran kita adalah pekerjaan dan cinta. Pekerjaan membantu memberi kita rasa tanggungjawab dan maksud, fokus yang konkret kepada tugas dan mimpi kita. Pekerjaan tak hanya memberi kedisiplinan dan struktur kepada hidup kita, ia juga memberi kita rasa bangga, pencapaian, dan kerangka untuk pemuasan. Sementara cinta merupakan bahan esensial yang menaruh kita dalam struktur masyarakat. Tanpa cinta, kita tersesat, hampa, dan tak berakar. Kita menjadi gelandangan di tanah kita sendiri, tidak terikat pada urusan orang lain.

Selain pekerjaan dan cinta, saya akan menambahkan dua bahan lain yang memberi makna kepada kehidupan. Pertama, memenuhi bakat apa pun yang terlahir bersama kita. Betapapun kita dianugerahi

oleh takdir dengan kemampuan dan kekuatan berbeda-beda, kita mesti berusaha mengembangkannya semaksimal mungkin, ketimbang membiarkannya berhenti tumbuh dan meluruh. Kita semua mengenal individu-individu yang tidak memenuhi janji yang mereka buat di masa kecil. Banyak dari mereka dihantui oleh gambaran cita-cita mereka. Daripada menyalahkan takdir, saya pikir sebaiknya kita menerima diri kita apa adanya dan berusaha memenuhi impian apa pun yang terjangkau oleh kemampuan kita.

Kedua, sebaiknya kita berusaha meninggalkan dunia sebagai tempat yang lebih baik daripada ketika kita memasukinya. Sebagai individu, kita bisa membuat perubahan, entah itu menyelidiki rahasia Alam, membersihkan lingkungan dan bekerja untuk perdamaian dan keadilan sosial, atau memelihara getaran semangat ingin tahu para pemuda dengan menjadi mentor dan pembimbing.

Transisi Menuju Peradaban Tipe I

Dalam sandiwara karya Anton Chekhov, *Three Sisters*, pada babak 2 Kolonel Vershinin menyatakan, "Dalam satu atau dua abad, atau dalam satu milenium ke depan, manusia akan hidup dengan cara baru, cara yang lebih bahagia. Kita tidak akan ada untuk menyaksikannya—tapi itulah alasannya kita hidup, itulah alasannya kita bekerja. Itulah alasannya kita menderita. Kita sedang membuatnya. Itulah maksud eksistensi kita. Satu-satunya kebahagiaan yang bisa kita ketahui adalah bekerja menuju tujuan tersebut."

Secara pribadi, bukannya depresi oleh keluasan alam semesta, saya

tergairahkan oleh ide tentang dunia-dunia yang sama sekali baru yang eksis di sebelah dunia kita. Kita hidup di sebuah abad di mana kita baru memulai eksplorasi kosmos dengan satelit dan teleskop antariksa kita, teori dan persamaan kita.

Saya juga merasa istimewa hidup di masa ketika dunia kita sedang menjalani langkah sedemikian heroik. Kita hidup untuk menyaksikan transisi yang barangkali terbesar dalam sejarah manusia, transisi menuju peradaban tipe I, barangkali transisi paling penting tapi juga berbahaya dalam sejarah manusia.

Di masa lalu, leluhur kita hidup dalam dunia yang kejam tak kenal ampun. Menurut kebanyakan sejarah manusia, orang-orang menjalani hidup singkat dan kasar, dengan harapan hidup rata-rata sekitar 20 tahun. Mereka hidup dalam ancaman penyakit yang terus-menerus, dalam kekuasaan takdir. Pengujian atas tulang-belulang leluhur kita mengungkap bahwa mereka luar biasa kelelahan, bukti bahwa mereka mengangkut muatan dan beban berat setiap hari; mereka juga memuat petunjuk tanda-tanda penyakit dan kejadian mengerikan. Bahkan seabad yang lalu, kakek moyang kita hidup tanpa manfaat sanitasi modern, antibiotik, pesawat jet, komputer, atau keajaiban elektronik lainnya.

Namun, cicit kita akan hidup dalam fajar peradaban planeter pertama Bumi. Jika kita tidak membiarkan insting brutal kita dalam merusak diri menghabiskan kita, cicit kita dapat hidup di zaman di mana kebutuhan, kelaparan, dan penyakit tak lagi menghantui nasib kita. Untuk pertama kalinya dalam sejarah manusia, kita mempunyai

cara untuk merusak semua kehidupan di Bumi ataupun merealisasikan surga di planet ini.

Saat anak-anak, saya sering bertanya-tanya seperti apa rasanya hidup jauh di masa depan. Hari ini, saya percaya bahwa seandainya saya bisa memilih untuk hidup di era kemanusiaan tertentu, saya akan memilih yang satu ini. Kita sekarang sedang berada di masa paling menggairahkan dalam sejarah manusia, puncak beberapa penemuan kosmik dan kemajuan teknologi terhebat sepanjang masa. Kita sedang membuat transisi bersejarah dari [kedudukan] sebagai pengamat pasif tarian alam menjadi koreografer tarian alam, dengan kemampuan untuk memanipulasi kehidupan, materi dan keberakalan. Namun bersama kekuatan mengagumkan ini teriring pula tanggungjawab besar, yaitu memastikan bahwa buah usaha kita dipakai secara bijak dan untuk kepentingan umat manusia.

Generasi yang sekarang hidup barangkali merupakan generasi manusia terpenting yang pernah berjalan di muka Bumi. Tak seperti generasi terdahulu, tangan kita menggenggam nasib masa depan spesies kita, apakah kita menjulang tinggi memenuhi janji kita sebagai peradaban tipe I atau jatuh ke dalam jurang *chaos*, polusi, dan peperangan. Keputusan yang kita buat akan berkumandang di sepanjang abad ini. Cara kita menyelesaikan perang global, proliferasi senjata nuklir, dan perselisihan sektarian dan etnis akan meletakkan atau menghancurkan fondasi peradaban tipe I. Mungkin maksud dan makna generasi sekarang adalah untuk memastikan bahwa transisi menuju peradaban tipe I dilakukan secara halus.

Ini pilihan kita. Ini adalah warisan generasi yang kini hidup. Ini adalah takdir kita.

Catatan

Bab 1: Gambaran Bayi Alam Semesta

30 *"upacara perjalanan kosmologi dari spekulasi..."* www.space.com, 11 Feb. 2003.

36 *"Apa yang akan hadirin dengar setelah ini semuanya salah."* Croswell, hal. 181.

36 *"Mereka gerombolan. Ini perang—ini perang!"* Croswell, hal. 173.

38 *"Kita tinggal di..."* Britt, Robert. www.space.com, 11 Feb. 2003.

39 *"Terus terang saja, kita tidak memahaminya..."* www.space.com, 15 Jan. 2002.

39 *"Kita telah meletakkan batu landasan teori kosmos yang koheren dan terpadu..." New York Times*, 12 Feb. 2003, hal. A34.

41 *"Teori indah semacam ini belum pernah keliru."* Lemonick, hal. 53.

42 *"Inflasi sangat memaksakan..." New York Times*, 29 Okt. 2002, hal. D4.

43 *"Apa yang lazim kita sebut 'alam semesta'..."* Rees, hal. 3.

48 *"Alam semesta berperilaku seperti seorang pengemudi yang melambat..." New York Times*, 18 Feb. 2003, hal. F1.

50 *"Seraya percaya, seperti halnya saya..."* Rothman, Tony. Majalah *Discover*, Juli 1987, hal. 87.

51 *"Wormhole, seandainya eksis, akan ideal untuk perjalanan*

antariksa...” Hawking, hal. 88.

Bab 2: Alam Semesta yang Paradoks

54 *“Bagaimana Anda tahu?...”* Bell, hal. 105.

57 *“Alam Semesta tidak berpinggir di semua arah...”* Silk, hal. 9.

59 *“Diperlukan keajaiban berketerusan...”* Croswell, hal. 8.

60 *“Betapa beruntung Bumi...”* Croswell, hal. 6.

62 *“Seandainya suksesi bintang tak berujung-pangkal...”* Smoot, hal. 28.

62 *“Saat pertama kali membaca kata-kata Poe, saya terpesona...”* Croswell, hal. 10.

64 *“Mungkin kita baru menyaksikan...” New York Times,* 10 Mar. 2004, hal. A1.

64 *“Hubble membawa kita sangat dekat...” New York Times,* 10 Mar. 2004, hal. A1.

65 *“Kemalangan orangtua saya, yang bertahun-tahun...”* Pais2, hal. 41.

67 *“Prinsip demikian dihasilkan dari sebuah paradoks...”* Schilpp, hal. 53.

69 *Jika waktu bisa berubah sesuai kecepatan Anda, sadar Einstein...* Kontraksi objek yang bergerak mendekati kecepatan cahaya sebetulnya ditemukan oleh Hendrik Lorentz dan George Francis FitzGerald tak lama sebelum Einstein, tapi mereka tidak memahami efek ini. Mereka mencoba menganalisis efek dengan kerangka Newtonian murni, berasumsi bahwa kontraksi

tersebut merupakan pemerasan elektromekanis atom-atom yang dihasilkan dengan menerobos "angin eter". Kekuatan ide Einstein adalah bahwa dia tidak hanya mendapatkan teori relativitas khusus dari satu prinsip (kekonstanan kecepatan cahaya), dia juga menafsirkan ini sebagai prinsip universal alam yang berkontradiksi dengan teori Newtonian. Jadi, distorsi ini merupakan atribut inheren ruang-waktu, bukan distorsi elektromekanis materi. Matematikawan besar Prancis, Henri Poincaré, mungkin hampir mendapatkan persamaan yang sama dengan Einstein. Tapi baru Einstein yang menyelesaikan himpunan persamaan dan pemahaman fisikal mendalam terkait persoalan tersebut.

71 *"Sebagai teman yang lebih tua, saya harus menasehatimu untuk tidak melakukannya..."* Pais2, hal. 239.

77 *"salah satu pencapaian terbesar..."* Folsing, hal. 444.

79 *"Tidak, bukan begitu..."* Parker, hal. 126.

79 *"Saya merasa seolah-olah..."* Brian, hal. 102.

82 *Ini adalah prinsip di balik...* Ketika mengembang, gas mendingin. Pada kulkas Anda, misalnya, sebuah pipa menghubungkan bagian dalam dan bagian luar *chamber*. Saat gas memasuki bagian dalam kulkas, ia mengembang yang mendinginkan pipa dan makanan. Saat meninggalkan bagian dalam kulkas, pipa berkontraksi, sehingga menjadi panas. Terdapat pula pompa mekanis yang mendorong gas melewati pipa. Dengan demikian, punggung kulkas menghangat, sementara bagian dalamnya

mendingin. Bintang-bintang bekerja kebalikannya. Ketika gravitasi memampatkan bintang, bintang memanas, sampai temperatur fusi tercapai.

Bab 3: Big Bang

96 *"Evolusi dunia bisa disamakan dengan pertunjukan kembang api..."* Lemonick, hal. 26.

96 *"Sebagai seorang ilmuwan, saya hanya tak percaya..."* Croswell, hal. 37.

97 *"90 persen teori Gamow..."* Smoot, hal. 61.

98 *"pelajaran seringkali ditunda saat Odessa dibombardir..."* Gamow1, hal. 14.

98 *"Saya pikir inilah eksperimen yang menjadikan saya seorang ilmuwan."* Croswell, hal. 39.

99 *"Ada seorang kawan muda dari Trinitas..."* Gamow2, hal. 100.

102 *Dengan gaya khas, Gamow meletakkan...* Croswell, hal. 40.

102 *"Setiap kali membeli balon, Anda memperoleh atom-atom..." New York Times*, 29 Apr. 2003, hal. F3.

104 *"Meramalkan kemungkinan dari hari-hari awal alam semesta..."* Gamow1, hal. 142.

106 *"Kami curahkan banyak energi untuk mengadakan ceramah soal penelitian kami..."* Croswell, hal. 41.

107 *"Saya simpulkan bahwa, sialnya, saya terlahir ke dunia..."* Croswell, hal. 42.

108 *Atas tindakan pembangkangan lancang ini...* Croswell, hal. 42.

108 *"Saya pikir kami nonton film tersebut beberapa bulan sebelumnya..."* Croswell, hal. 43.

110 *"Mana mungkin saya buat frase itu sebagai hinaan..."* Croswell, hal. 45–46.

111 *"Saat berusia 15 tahun saya mendengar Fred Hoyle memberi kuliah di BBC..."* Croswell, hal. 111. Kuliah kelima dan terakhir Hoyle, bagaimanapun, merupakan kuliah paling kontroversial karena dia mengkritik agama. (Hoyle pernah bilang, dengan kekasarannya yang khas, bahwa solusi untuk permasalahan di Irlandia Utara adalah memenjarakan semua pendeta dan pastur. "Tidak semua perselisihan agama yang pernah saya lihat atau baca sama bernilainya dengan kematian anak semata wayang," ujarnya. Croswell, hal. 43.)

113 *"Dalam keasyikan menghitung..."* Gamow1, hal. 127.

122 *"Entah karena terlalu nyaman dalam Cadillac..."* Croswell, hal. 63.

122 *"Diyakini luas bahwa eksistensi gelombang mikro latar..."* Croswell, hal. 63–64.

125 *"Penjilat dan pencuri masa kini..."* Croswell, hal. 101.

125 *Dia marah karena merasa diabaikan ketika Hadiah Nobel...* Walaupun Zwicky, hingga hari kematiannya, secara terbuka mengungkapkan kegetirannya lantaran penemuan-penemuan ilmiahnya diabaikan, Gamow tetap membisu di depan publik saat dirinya dilewatkan untuk Hadiah Nobel, kendati dia mengungkapkan kekecewaan besarnya dalam surat pribadi. Gamow justru mengarahkan banyak bakat dan kreatifitas ilmiah

dirinya ke penelitian DNA, yang akhirnya menyingkap salah satu rahasia bagaimana alam membuat asam amino dari DNA. Peraih Nobel, James Watson, bahkan mengakui kontribusi tersebut dengan menaruh nama Gamow dalam judul autobiografinya baru-baru ini.

127 *"Itu menjadi slogan dalam keluarga saya..."* Croswell, hal. 91.

129 *"Ketika fosil-fosil ditemukan pada bebatuan..." Scientific American,* Juli 1992, hal. 17.

Bab 4: Inflasi dan Alam Semesta Paralel

144 *"Bagaimana Anda dapat menggantung 500.000 pon air..."* Cole, hal. 43.

145 *"Seperti unicorn, monokutub masih terus mempesona..."* Guth, hal. 30.

150 *"Saya masih cemas suatu konsekuensi dari teori ini mungkin..."* Guth, hal. 186–67.

150 *"Apa Steve keberatan dengannya?..."* Guth, hal. 191.

151 *"Saya berada dalam situasi marjinal..."* Guth, hal. 18.

152 *"Ide 'inflasi' ini terdengar gila..."* Kirschner, hal. 188.

152 *"mode yang dikenakan fisikawan high-energy kepada kosmolog..."* Rees1, hal. 171.

154 *"Saya cuma merasa, mustahil Tuhan..."* Croswell, hal. 124.

159 *Walaupun sudah dianggap biasa, kesetaraan...* Rees2, hal. 100.

159 *Ada satu pengecualian nyata dalam aturan ini...* Para ilmuwan telah mencari antimateri di alam semesta dan menemukan

sedikit (kecuali beberapa arus antimateri di dekat inti Bima Sakti). Karena materi dan antimateri betul-betul tidak bisa dibedakan, mematuhi hukum fisika dan kimia yang sama, sungguh sulit untuk membedakan mereka. Namun, ada satu cara, yaitu mencari emisi sinar gamma khas sebesar 1,02 juta eV. Ini adalah sidik jari keberadaan antimateri karena merupakan energi minimum yang dilepaskan ketika sebuah elektron bertubrukan dengan antielektron. Tapi saat kita memindai alam semesta, kita tidak menjumpai bukti adanya sinar gamma 1,02 juta eV berjumlah besar, sebuah indikasi bahwa antimateri sangat langka di alam semesta.

162 *"Rahasia alam adalah kesimetrian..."* Cole, hal. 190.

165 *"Segala sesuatu yang terjadi di dunia kita..." Scientific American,* Juni 2003, hal. 70.

168 *"Saya sungguh terperdaya oleh radiasi kosmik latar..." New York Times,* 23 Jul. 2002, hal. F7.

170 *Bila bintang kerdil putih memiliki berat lebih dari 1,4 massa surya...* Batas Chandrasekhar bisa diperoleh dengan argumentasi berikut. Di satu sisi, gravitasi beraksi memampatkan bintang kerdil putih hingga densitas luar biasa, yang membuat elektron-elektron pada bintang saling mendekat bersama. Di sisi lain, terdapat prinsip eksklusi Pauli, yang menyatakan bahwa dua elektron tidak dapat mempunyai bilangan quantum yang sama persis yang menggambarkan statusnya. Ini berarti dua elektron tidak dapat menempati titik yang sama persis berikut atribut

yang sama, dengan demikian terdapat gaya netto yang mendorong elektron saling menjauh (selain tolakan elektrostatik). Ini artinya terdapat tekanan netto yang mendorong keluar, mencegah elektron-elektron tergumal lebih jauh menuju satu sama lain. Oleh sebab itu kita bisa mengkalkulasi massa bintang kerdil putih ketika dua gaya ini (tolakan dan tarikan) persis saling menetralkan, dan ini merupakan batas 1,4 massa surya Chandrasekhar.

Untuk bintang neutron, kita mempunyai gravitasi yang menggumalkan bola neutron murni, sehingga terdapat batas Chandrasekhar baru sebesar kira-kira 3 massa surya, sebab neutron-neutron tersebut juga saling menolak akibat gaya ini. Tapi sekali bintang neuton menjadi lebih masif dari batas Chandrasekhar-nya, ia akan kolaps menjadi *black hole*.

171 *"Lambda telah senantiasa menjadi konsep bermata liar..."* Croswell, hal. 204.

171 *"Saya masih menggelengkan kepala, tapi kami sudah mengecek segalanya..."* Croswell, hal. 222.

172 *"penemuan eksperimen teraneh sejak saya menggeluti fisika."* *New York Times*, 23 Jul. 2002, hal. F7.

Bab 5: Portal Dimensi dan Perjalanan Waktu

185 *"Itu akan jadi malapetaka tulen bagi teori..."* Parker, hal. 151.

188 *"Hasil krusial dari investigasi ini adalah pemahaman jernih..."* Thorne, hal. 136.

188 *"ada hukum Alam yang mencegah sebuah bintang berperilaku..."* Thorne, hal. 162.

192 *"Lintasi cincin gaib ini dan—presto!..."* Rees1, hal. 84.

194 *"10 tahun lalu, bila Anda menemukan sebuah objek yang Anda pikir adalah black hole..."* Majalah *Astronomy*, Juli 1998, hal. 44.

198 *"Bintang ini teregangkan melampaui..."* Rees1, hal. 88.

205 *"Keadaan ini terasa menunjukkan keabsurdan..."* Nahin, hal. 81.

206 *"Esai Kurt Gödel merupakan, menurut pendapat saya, sebuah kontribusi penting..."* Nahin, hal. 81.

211 *Sebagaimana ditunjukkan oleh Jacob Bekenstein dan Stephen Hawking...* Mereka adalah salah satu ilmuwan pertama yang menerapkan mekanika quantum pada fisika *black hole*. Menurut teori quantum, terdapat probabilitas terhingga bahwa partikel subatom akan membuat jalan keluarnya dari tarikan gravitasi *black hole*, dan karenanya *black hole* perlahan-lahan memancarkan radiasi. Ini merupakan contoh *tunneling*.

215 *"Segala sesuatu yang tidak dilarang artinya wajib."* Thorne, hal. 137.

220 *"tidak ada bukti yang mengindikasikan bahwa mesin waktu..."* Nahin, hal. 521.

220 *"Tidak ada hukum fisika yang menghalangi munculnya kurva mirip-waktu tertutup."* Nahin, hal. 522.

220 *"bukan sebagai pemulihan nama baik bagi para peminat perjalanan waktu, tapi lebih sebagai..."* Nahin, hal. 522.

223 *"Saat menemukan solusi ini..."* Gott, hal. 104.

223 *"Untuk memungkinkan perjalanan waktu ke masa lalu, string-string kosmik dengan massa-per-satuan-panjang..."* Gott, hal. 104.

224 *"Simpal string kolaps yang cukup besar untuk memungkinkan Anda mengitarinya..."* Gott, hal. 110.

225 *Paradoks jenis kelamin.* Contoh terkenal paradoks jenis kelamin ditulis oleh filsuf Inggris, Jonathan Harrison, dalam sebuah kisah yang dipublikasikan pada 1979 di majalah *Analysis*. Pembaca majalah ditantang untuk memahaminya.

Kisahnya diawali dengan seorang perempuan muda, Jocasta Jones, yang pada suatu hari menemukan kulkas tua. Di dalam kulkas dia menemukan seorang pria muda tampan yang terbeku hidup-hidup. Setelah mengeluarkan dan melunakkannya, dia tahu bahwa namanya adalah Dum. Dum bercerita kepada dia bahwa dirinya mempunyai sebuah buku yang menggambarkan cara untuk membangun kulkas yang dapat mengawetkan manusia dan cara untuk membangun mesin waktu. Keduanya jatuh cinta, menikah, dan tak lama kemudian mempunyai bayi lelaki, yang mereka beri nama Dee.

Bertahun-tahun kemudian, ketika Dee telah tumbuh menjadi pria muda, dia mengikuti jejak ayahnya dan memutuskan untuk membangun mesin waktu. Kali ini, Dee dan Dum mengadakan perjalanan ke masa lalu, membawa serta bukunya. Namun, perjalanan itu berakhir tragis, dan mereka mendapati diri mereka terdampar di masa lalu yang jauh dan kehabisan makanan. Sadar bahwa ajalnya sudah dekat, Dee melakukan

satu-satunya hal yang mungkin untuk tetap hidup, yaitu membunuh ayahnya dan memakannya. Dee lalu memutuskan untuk mengikuti instruksi buku dan membangun kulkas. Untuk menyelamatkan diri, dia masuk ke kulkas dan terbeku dalam kondisi mati suri.

Bertahun-tahun kemudian, Jocasta Jones menemukan kulkas tersebut dan memutuskan untuk mengeluarkan dan melunakkan Dee. Untuk menyamar, Dee menyebut dirinya Dum. Mereka jatuh cinta, dan kemudian memiliki bayi, yang mereka beri nama Dee...dan begitulah siklus berlanjut.

Reaksi terhadap tantangan Harrison memancing banyak tanggapan. Seorang pembaca menyatakan bahwa "implikasi kisah tersebut begitu berlebihan sehingga akan dianggap sebagai *reductio ad abusurdum*[24] terhadap satu asumsi meragukan yang menjadi sandaran kisah: kemungkinan perjalanan waktu." Perhatikan bahwa kisah tersebut tidak mengandung paradoks moyang, sebab Dee memenuhi masa lalu dengan pergi ke masa lalu untuk menemui ibunya. Dee tidak melakukan sesuatu yang membuat masa kini menjadi mustahil. (Namun terdapat paradoks informasi, sebab buku yang memuat rahasia kematisurian dan perjalanan waktu tersebut muncul entah dari mana. Tapi buku itu sendiri tidak esensial dalam kisahnya.)

Pembaca lain mengemukakan paradoks biologis yang aneh. Karena separuh DNA individu berasal dari ibu dan separuhnya

[24] Bukti kepalsuan premis dengan menunjukkan bahwa konsekuensi logisnya adalah absurd—penj.

lagi berasal dari ayah, ini berarti Dee pasti mempunyai separuh DNA-nya dari Ny. Jones dan separuhnya dari ayahnya, Dum. Namun, Dee adalah Dum. Oleh sebab itu, Dee dan Dum pasti mempunyai DNA yang sama karena mereka adalah sosok yang sama. Tapi ini mustahil lantaran, berdasarkan hukum genetika, separuh gen mereka berasal dari Ny. Jones. Dengan kata lain, kisah-kisah perjalanan waktu di mana seseorang pergi ke masa lalu, menemui ibunya, dan ayahnya sendiri, melanggar hukum genetika.

Seseorang mungkin berpikir terdapat jalan keluar dalam paradoks jenis kelamin. Jika Anda mampu menjadi ayah dan ibu Anda, maka seluruh DNA Anda berasal dari Anda sendiri. Dalam kisah karangan Robert Heinlein, *All You Zombies,* seorang gadis muda menjalani operasi ganti kelamin dan dua kali pergi ke masa lalu untuk menjadi ibu, ayah, putra, dan putrinya sendiri. Namun, dalam kisah ganjil ini pun, terdapat pelanggaran halus terhadap hukum genetika.

Dalam *All You Zombies,* seorang gadis muda bernama Jane tumbuh dewasa di panti asuhan. Pada suatu hari, dia bertemu dan jatuh cinta dengan seorang pria asing tampan. Dia melahirkan bayi perempuan, yang secara misterius diculik. Jane mengalami komplikasi pada waktu bersalin, dan dokter terpaksa mengubah Jane menjadi lelaki. Bertahun-tahun kemudian, lelaki ini bertemu dnegan seorang pelancong waktu, yang membawanya kembali ke masa lalu, di mana dia bertemu Jane sebagai

gadis muda. Mereka jatuh cinta, dan Jane hamil. Dia kemudian menculik bayi perempuannya sendiri dan pergi lebih jauh ke masa lalu, menurunkan bayi Jane di sebuah panti asuhan. Lalu Jane tumbuh dewasa hingga bertemu dengan seorang pria asing tampan. Kisah ini hampir terhindar dari paradoks jenis kelamin. Separuh gen Anda berasal dari Jane si gadis muda, dan separuhnya lagi berasal dari Jane si pria asing tampan. Namun, operasi ganti kelamin tidak bisa mengubah kromosom X Anda menjadi kromosom Y, dan karenanya kisah ini juga mempunyai paradoks jenis kelamin.

227 *"Kita tidak mungkin mengirim seorang pelancong waktu kembali ke Taman Eden..."* Hawking, hal. 84–85.

227 *"Contoh, saya bebas berjalan di atas atap..."* Hawking, hal. 84–85.

229 *Ini menyingkirkan divergensi tak terhingga yang ditemukan oleh Hawking...* Pada akhirnya, untuk memecahkan persoalan-persoalan matematis kompleks ini, seseorang harus beralih ke fisika jenis baru. Contohnya, banyak fisikawan, seperti Stephen Hawking dan Kip Thorne, memakai apa yang disebut penaksiran semiklasik (*semiclassical approximation*)—yakni, mereka mengambil teori hibrid. Mereka berasumsi bahwa partikel-partikel subatom mematuhi prinsip quantum, tetapi mereka mempertimbangkan gravitasi bersifat halus dan tidak terquantisasi (dengan kata lain, mereka membuang graviton dari kalkulasi). Karena semua divergensi dan anomali berasal dari graviton, pendekatan semiklasik ini tidak mengalami ketakterhinggaan.

Namun, seseorang dapat menunjukkan secara matematis bahwa pendekatan semiklasik adalah tidak konsisten—dengan kata lain, ia akhirnya memberi jawaban keliru, sehingga hasil dari kalkulasi semiklasik tidak dapat dipercaya, terutama dalam bidang-bidang yang paling menarik perhatian, seperti pusat *black hole*, jalan masuk menuju mesin waktu, dan jenak *big bang*. Perhatikan, banyak "bukti", yang menyatakan bahwa perjalanan waktu tidak mungkin dilakukan atau Anda tidak bisa menerobos *black hole*, dikerjakan dengan penaksiran semiklasik dan karenanya tidak terpercaya. Itulah mengapa kita harus beralih ke teori gravitasi quantum seperti teori string dan teori-M.

Bab 6: Alam Semesta Quantum Paralel

236 *Wheeler-lah yang menciptakan...* Bartusiak, hal. 62.

238 *"...hukum-hukum fisika dasar yang dibutuhkan untuk teori matematis..."* Cole, hal. 68.

243 *"bagi intelek secerdas itu, tak ada yang tak pasti..."* Cole, hal. 68.

243 *"Saya adalah seorang determinis, dipaksa bertindak seolah-olah terdapat kehendak bebas..."* Brian, hal. 185.

245 *"Wasit 1: Saya memutuskannya seolah-olah saya melihatnya..."* Bernstein, hal. 96.

246 *"Kegilaan adalah kemampuan untuk membedakan secara halus..."* Weinberg2, hal. 103.

246 *"Bukankah semua filsafat seolah-olah tertulis dengan manis?..."* Pais2, hal. 318.

246 *Fisikawan juga gemar menceritakan kisah meragukan yang diduga diceritakan...* Barrow1, hal. 185.

247 *"Terdapat satu masa ketika suratkabar mengatakan bahwa hanya 12 orang..."* Barrow3, hal. 143.

247 *"menguraikan alam sebagai sesuatu yang absurd dari sudut pandang akal sehat..."* Greene1, hal. 111.

248 *"Saya akui dengan tidak senang bahwa sepanjang perjalanan hidup saya dalam kerangka teoritis..."* Weinberg1, hal. 85.

248 *"Sains tidak bisa memecahkan misteri tertinggi Alam..."* Barrow3, hal. 378.

250 *"Menakjubkan bagi saya untuk hadir dalam dialog..."* Folsing, hal. 589.

251 *"Bagi Bohr, ini adalah pukulan telak..."* Folsing, hal. 591; Brian, hal. 199.

252 *"Saya yakin teori ini niscaya mengandung..."* Folsing, hal. 591.

252 *"Tentu saja, hari ini setiap bajingan berpikir dirinya tahu jawabannya..."* Kowalski, hal. 156.

253 *"Energi yang dihasilkan..." New York Herald Tribune*, 12 Sep. 1933.

255 *Karena tidak ada yang menghentikan kekuatan dahsyat Nazi... New York Times*, 7 Feb. 2002, hal. A12.

260 *"Mekanika quantum biasa tidak lebih filosofis..."* Rees1, hal. 244.

260 *"tidak mungkin merumuskan hukum mekanika quantum..."* Crease, hal. 67.

260 *"Tidak ada yang nyata sampai itu dialami."* Barrow1, hal. 458.

260 *"Bagi saya sebagai seorang manusia..."* Majalah *Discover*, Juni

2002, hal. 48.

266 *"Terdapat alam semesta..."* Dikutip dalam program BBC-TV *Parallel Universes*, 2002.

266 *"Kita dihantui oleh kesadaran..."* Wilczek, hal. 128–129.

266 *"Kapan pun seorang makhluk dihadapkan dengan beberapa kemungkinan tindakan..."* Rees1, hal. 246.

269 *"Di mana ada asap, di situ ada rokok."* Bernstein, hal. 131.

269 *"Saya sungguh dibuat gila oleh pertanyaan tersebut..."* Bernstein, hal. 132.

279 *"yang mengenal baik satu sama lain..." National Geographic News*, www.nationalgeographic.com, 29 Jan. 2003.

279 *"Mungkin, objek lebih besar..."*

280 *"Kuncinya sekarang adalah..."*

Bab 7: Teori-M: Induk Semua String

286 *"Saya menemukan sebuah prinsip umum..."* Nahin, hal. 147.

288 *"Mungkin terdapat sejumlah Alam Semesta tiga-dimensi..."* Wells2, hal. 20.

292 *"Kau mungkin terhibur mendengar..."* Pais2, hal. 179.

292 *"Saya yakin saya benar..."* Moore, hal. 432.

293 *"Kami di belakang merasa yakin..."* Kaku2, hal. 137.

295 *"Menurut aturan, fisikawan abad 20..."* Davies2, hal. 102.

299 *Dalam sebuah persamaan yang panjangnya hampir tidak satu setengah inchi, kita dapat meringkas semua informasi yang terkandung dalam teori string.* Pada prinsipnya, semua teori

string bisa diringkas dari segi teori string medan kita. Namun, teori tersebut belum dalam bentuk final, sebab invariansi nyata Lorentz rusak. Kemudian, Witten mampu menuliskan teori string medan boson terbuka versi elegan yang kovarian. Kemudian, kelompok MIT, kelompok Kyoto, dan saya mampu menyusun teori string boson tertutup yang kovarian (yang, bagaimanapun, nonpolinomial dan karenanya sulit dikerjakan). Hari ini, dengan teori-M, perhatian telah bergeser kepada membran, tapi tidak jelas apakah teori membran medan bisa disusun.

301 *Demikian pula, model superstring Neveu, Schwarz, dan Ramond hanya dapat eksis di 10 dimensi.* Sebetulnya terdapat beberapa alasan mengapa sepuluh dan sebelas dimensi lebih disukai dalam teori string dan teori-M. Pertama, jika kita mempelajari gambaran kelompok Lorentz mengenai dimensi yang semakin tinggi, kita menemukan bahwa pada umumnya jumlah fermion tumbuh secara eksponensial bersama dimensi, sedangkan jumlah boson tumbuh secara linier bersama dimensi. Dengan demikian, untuk dimensi rendah saja kita bisa mempunyai teori supersimetris dengan jumlah fermion dan boson yang setara. Jika kita melakukan analisis seksama atas teori kelompok tersebut, kita menemukan bahwa kita memperoleh keseimbangan sempurna apabila mempunyai sepuluh dan sebelas dimensi (asumsikan maksimal kita mempunyai partikel pusingan-2, bukan 3 atau lebih). Dengan demikian, atas dasar teoritis murni

kelompok tersebut, kita dapat menunjukkan bahwa sepuluh dan sebelas dimensi lebih disukai.

Ada cara lain untuk menunjukkan bahwa sepuluh dan sebelas merupakan "angka ajaib". Jika kita mempelajari diagram simpal tinggi, kita menemukan bahwa pada umumnya ketunggalan tidak terjaga, yang menjadi malapetaka bagi teori. Itu artinya partikel-partikel bisa muncul dan menghilang seperti sulap. Kita menemukan bahwa ketunggalan terpulihkan untuk teori perturbasi di dimensi-dimensi ini.

Kita juga bisa menunjukkan bahwa di sepuluh dan sebelas dimensi, partikel-partikel "hantu" bisa dibuat menghilang. Mereka adalah partikel yang tidak menghormati kondisi lazim partikel fisikal.

Ringkasnya, kita bisa menunjukkan bahwa di "angka ajaib" ini kita dapat mempertahankan (a) supersimetri, (b) keterhinggaan teori perturbasi, (c) ketunggalan rangkaian perturbasi, (d) invariansi Lorentz, (e) penghapusan anomali.

302 *"Well, John, di berapa..."* Komunikasi pribadi.

305 *Divergensi serupa mengganggu teori gravitasi quantum.* Ketika fisikawan mencoba memecahkan sebuah teori kompleks, mereka sering menggunakan "teori perturbasi", yaitu memecahkan teori sedrehana terlebih dahulu dan kemudian menganalisis penyimpangan kecil dari teori ini. Penyimpangan kecil ini, pada gilirannya, memberi kita faktor koreksi kecil dalam jumlah tak terhingga terhadap teori asli yang didambakan. Tiap-tiap koreksi

biasanya disebut diagram Feynman dan dapat digambarkan secara grafis melalui diagram yang merepresentasikan semua kemungkinan cara beragam partikel menubruk satu sama lain.

Secara historis, fisikawan disulitkan oleh fakta bahwa suku-suku teori perturbasi menjadi tak terhingga, membuat seluruh program sia-sia. Namun, Feynman dan koleganya menemukan serangkaian trik dan manipulasi cerdik yang dengannya mereka dapat menyembunyikan ketakterhinggaan ini (berkat penemuan ini mereka memenangkan Hadiah Nobel tahun 1965).

Persoalan gravitasi quantum adalah bahwa set koreksi quantum ini sebetulnya tidak terhingga—tiap-tiap faktor koreksi sama-sama tak terhingga, sekalipun kita memakai sekarung trik yang ditemukan oleh Feynman dan koleganya. Kita katakan bahwa gravitasi quantum "tidak dapat dinormalkan kembali".

Dalam teori string, perluasan perturbasi ini betul-betul terhingga, itulah alasan fundamental mengapa kita mempelajari teori string di tempat pertama. (Secara teknis, bukti keras dan mutlak atas hal ini tidak ada. Namun, kelas-kelas diagram yang tak terhingga bisa ditunjukkan terhingga, dan argumen matematis yang kurang keras telah menunjukkan bahwa teori tersebut mungkin terhingga pada semua kelas.) Namun, perluasan perturbasi sendiri tidak bisa melambangkan alam semesta yang kita kenal, sebab perluasan perturbasi mempertahankan supersimetri sempurna, yang tidak kita jumpai di alam. Di alam semesta, kita melihat bahwa kesimetrian telah

rusak parah (contoh, kita tidak melihat bukti eksperimen adanya superpartikel). Karenanya, fisikawan menginginkan uraian teori string yang "nonperturbatif", yang mana luar biasa sulit. Kenyataannya, sekarang ini tidak ada cara seragam untuk mengkalkulasi koreksi nonperturbatif pada teori medan quantum. Terdapat banyak persoalan dalam menyusun uraian nonperturbatif. Contohnya, jika kita ingin meningkatkan kekuatan gaya-gaya dalam teori, itu berarti tiap-tiap suku dalam teori perturbasi semakin membesar, sehingga teori perturbasi menjadi tak masuk akal. Contoh, penjumlahan 1+2+3+4... menjadi tidak masuk akal, sebab tiap-tiap suku semakin membesar. Keunggulan teori-M adalah bahwa, untuk pertama kalinya, kita dapat membangun hasil nonperturbatif lewat dualitas. Ini berarti batas nonperturbatif sebuah teori string bisa ditunjukkan ekuivalen dengan teori string lain.

305 *Lambat laun, mereka menyadari bahwa solusinya mungkin adalah membuang pendekatan Plester-Luka dan mengadopsi teori yang sama sekali baru.* Teori string dan teori-M melambangkan pendekatan radikal baru terhadap relativitas umum. Sementara Einstein membangun relativitas umum di seputar konsep ruang-waktu melengkung, teori string dan teori-M dibangun di seputar konsep objek mengulur (*extended object*), seperti string atau membran, yang bergerak di ruang supersimetris. Pada akhirnya, kita mungkin dapat menjalin dua gambaran ini, tapi untuk saat ini tidak dipahami dengan baik.

307 *"Saya bukan orang rendah hati..."* Majalah *Discover*, Agustus 1991, hal. 56.

310 *"Musik menciptakan keteraturan dari kekacauan..."* Barrow2, hal. 305.

310 *"Musik adalah latihan aritmetika tersembunyi sebuah..."* Barrow2, hal. 205.

311 *"Musik dan sains [dahulu] diidentifikasi secara begitu mendalam..."* Barrow2, hal. 205.

318 *Ini persis menggambarkan kesimetrian superstring, yang disebut supersimetri.* Di akhir 1960-an, ketika fisikawan pertama kali mulai mencari kesimetrian yang dapat mencakup semua partikel alam, gravitasi tidak dimasukkan. Ini lantaran terdapat dua tipe kesimetrian. Kesimetrian yang dijumpai dalam fisika partikel adalah kesimetrian yang merombak susunan partikel. Tapi terdapat pula kesimetrian tipe lain, yang mengubah ruang menjadi waktu, dan kesimetrian ruang-waktu ini diasosiasikan dengan gravitasi. Teori gravitasi bukan didasarkan pada kesimetrian partikel-partikel titik yang saling bertukar tempat, melainkan pada kesimetrian rotasi di empat dimensi: kelompok Lorentz di $O(_{3,1})$ empat dimensi.

Kali ini, Sidney Coleman dan Jeffrey Mandula membuktikan sebuah teorema terkenal yang menyatakan bahwa mustahil untuk mengawinkan kesimetrian ruang-waktu, yang menguraikan gravitasi, dengan kesimetrian yang menguraikan partikel. Teorema pelarang ini memadamkan setiap upaya untuk

mengkonstruksi "kesimetrian induk" (master symmetry) alam semesta. Contoh, jika seseorang mencoba mengawinkan $SU(5)$ kelompok Lorentz dengan $O(3,1)$ kelompok relativitas, dia akan menemukan bencana. Misalnya, kumpulan partikel tiba-tiba akan menjadi terhubung (*continuous*) daripada terpisah. Ini mengecewakan, sebab artinya seseorang tidak dapat secara naif memasukkan gravitasi bersama gaya lain selama dia terpikat kepada kesimetrian lebih tinggi. Ini artinya *unified field theory* barangkali mustahil.

Namun, teori string memecahkan semua persoalan matematis menjengkelkan ini dengan kesimetrian paling mumpuni yang pernah dijumpai dalam fisika partikel: supersimetri. Sekarang ini, supersimetri merupakan satu-satunya cara yang diketahui untuk menghindari teorema Coleman-Mandula. (Supersimetri mengeksploitasi celah kecil tapi krusial dalam teorema ini. Biasanya, ketika kita memasukkan bilangan seperti a atau b, kita berasumsi bahwa $a \times b = b \times a$. Ini diterima secara diam-diam dalam teorema Coleman-Mandula. Tapi dalam supersimetri, kita memasukkan "superbilangan", seperti bahwa $a \times b = -b \times a$. Superbilangan-superbilangan ini mempunyai atribut aneh. Misalnya, jika $a \times a = 0$, maka a bisa bukan nol, yang terdengar absurd untuk perhitungan lazim. Jika kita menyisipkan superbilangan ke dalam teorema Colema-Mandula, kita mendapati bahwa ia gagal.)

321 *Supersimetri juga memecahkan serangkaian persoalan sangat*

teknis... Pertama, ia memecahkan persoalan hirarki, yang menggagalkan teori GUT. Ketika menyusun *unified field theory*, kita menghasilkan dua skala massa yang berbeda sekali. Beberapa partikel, seperti proton, mempunyai massa seperti yang dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Namun partikel lain sungguh masif dan mempunyai energi yang sebanding dengan yang ditemukan dekat *big bang*, energi Planck. Dua skala massa ini harus tetap terpisah. Namun, saat kita sertakan dalam koreksi quantum, kita menemukan bencana. Disebabkan oleh fluktuasi quantum, dua tipe massa ini mulai bercampur, karena terdapat probabilitas terhingga bahwa salah satu set partikel ringan akan berubah menjadi set partikel berat lain, dan sebaliknya. Ini artinya pasti terdapat rangkaian kesatuan partikel bermassa bervariasi di antara massa sehari-hari dan massa amat besar yang ditemukan saat *big bang*, yang jelas tidak kita saksikan di alam. Di sinilah supersimetri masuk. Terdapat proses penetralan menawan yang terjadi, sehingga dua skala tersebut tak pernah saling berinteraksi. Suku fermion persis menetralkan suku boson, memberikan hasil terhingga. Sepanjang pengetahuan kita, supersimetri mungkin merupakan satu-satunya solusi untuk persoalan hirarki.

Di samping itu, supersimetri memecahkanpersoalan yang pertama kali diajukan oleh teorema Coleman-Mandula pada 1960-an, yang membuktikan bahwa mustahil untuk mengkombinasikan kelompok kesimetrian yang beraksi terhadap quark,

menurut teorema tersebut. Ini mematahkan harapan, sebab berarti unifikasi adalah mustahil secara matematis. Namun, supersimetri menyediakan jalan keluar halus terhadap teorema ini. Itu merupakan salah satu dari banyak terobosan teoritis supersimetri.

339 *"Matematika murni adalah syair ide-ide logis."* Cole, hal. 174.

339 *"[Alam semesta] tidak dapat dibaca sampai kita mempelajari bahasanya..."* Wilzcek, hal. 138.

340 *"Selisihnya tidak kecil..."* www.edge.org, 10 Feb. 2003.

343 *"Timbul banyak kegemparan ketika pertama kali dinyatakan..."* www.edge.org, 10 Feb. 2003.

348 *"Mungkin percepatan perluasan alam semesta..."* Seife, hal. 197.

349 *"Itu sama dengan melempar sebuah kursi ke dalam black hole..."* Majalah *Astronomy*, Mei 2002, hal. 34.

349 *"Jika Anda memulai..."* Majalah *Astronomy*, Mei 2002, hal. 34.

349 *"Flat tambah flat..."* Majalah *Astronomy*, Mei 2002, hal. 34.

350 *"Saya tidak berpikir Paul dan Neil hampir membuktikan kasus mereka..."* Majalah *Discover*, Februari 2004, hal. 41.

350 *"Dalam jangka panjang, saya pikir tidak terelakkan lagi bahwa teori string dan teori-M..."* Majalah *Astronomy*, Mei 2002, hal. 39.

351 *"Saya pikir sangat bodoh..."* Majalah *Discover*, Februari 2004, hal. 41.

357 *"Sebagian besar fisikawan ingin percaya bahwa informasi tidak hilang..."* Greene1, hal. 343.

362 *Maldacena menunjukkan bahwa terdapat dualitas di antara alam*

semesta 5-dimensi ini... Lebih tepatnya, apa yang Maldacena tunjukkan adalah bahwa teori string tipe II, yang dikompaktifikasi menjadi ruang anti-de Sitter 5-dimensi, adalah dual untuk teori medan konformal 4-dimensi yang berlokasi di perbatasannya. Harapan awalnya adalah bahwa versi modifikasi dualitas aneh ini dapat dibangun antara teori string dan QCD (kromodinamika quantum) 4-dimensi, teori interaksi kuat. Jika dualitas demikian bisa dikonstruksi, itu akan menghadirkan terobosan, sebab kemudian seseorang dapat mengkomputasi atribut partikel-partikel yang berinteraksi kuat, seperti proton, langsung dari teori string. Namun, saat ini harapan tersebut belum terpenuhi.

366 *"Teori medan, dengan ketakterhinggaannya..." Scientific American*, Agustus 2003, hal. 65.

367 *"sebuah teori final..."* Ibid.

373 *"Sekarang ini, teoris string ada dalam posisi yang serupa dengan kehilangan Einstein atas prinsip keekuivalenan..."* Greene1, hal. 376.

Bab 8: Alam Semesta Diciptakan?

378 *"Tanpa Bulan, tidak akan ada cahaya bulan, tidak ada kalender..."* Brownlee dan Ward, hal. 222.

380 *"Ada dunia dengan jumlah tak terhingga dan ukuran berlainan..."* Barrow1, hal. 37.

381 *"Anda dapat membayangkan bintang dan planet besar sebagai*

pasangan dansa..." www.sciencedaily.com, 4 Juli 2003.

383 *Yang begitu tak biasa dari planet ini...* www.sciencedaily.com, 4 Juli 2003.

383 *"Kami sedang bekerja untuk mensurvey 2.000 bintang terdekat mirip matahari..."* www.sciencedaily.com, 4 Juli 2003.

386 *Fisikawan Don Page meringkas...* Page, Don. *"The Importance of the Anthropic Principle."* Pennsylvania State University, 1987.

386 *"Keteraturan menawan..."* Margenau, hal. 52.

386 *"bukan hanya 'dunia tua', tapi juga istimewa dan disetel halus untuk kehidupan..."* Rees2, hal. 166.

387 *"Hampir tidak tertahankan bagi manusia untuk percaya..." New York Times*, 29 Okt. 2002, hal. D4.

387 *"Sulit bagi saya untuk percaya bahwa orang-orang akan menggunakan prinsip antropik..."* Lightman, hal. 479.

388 *"Penyetelan halus nyata, yang kepadanya eksistensi kita bergantung..."* Rees1, hal. 3.

389 *Rees menunjuk pada fakta bahwa...* Rees2, hal. 56.

390 *"Pada satu detik setelah big bang, Omega tidak boleh berselisih dari kesatuan..."* Rees2, hal. 99.

391 *"Gumpalan-gumpalan besar materi akan berkondensasi menjadi black hole besar..."* Majalah *Discover*, November 2000, hal. 68.

394 *"Jika ada stok besar pakaian, tidak heran..."* Majalah *Discover*, November 2000, hal. 66.

Bab 9: Mencari Gema Dari Dimensi Kesebelas

398 *"[Teori] alam semesta lain bisa memabukkan..."* Croswell, hal. 128.

399 *Segala hal mulai dari peta terkomputerisasi yang ada di dalam mobil sampai misil penjelajah...* Bartusiak, hal. 55.

399 *Tapi untuk menjamin akurasi seluar biasa itu, ilmuwan harus mengkalkulasi koreksi kecil pada hukum Newton lantaran adanya relativitas, yang menyatakan bahwa frekuensi gelombang radio akan sedikit tergeser saat satelit membumbung di angkasa luar.* Pergeseran ini terjadi dalam dua cara. Karena satelit-satelit dekat Bumi bergerak pada kecepatan 18.000 mil per jam, relativitas khusus mengambil alih, dan waktu melambat pada satelit. Ini artinya jam pada satelit terlihat sedikit melambat dibanding jam di Bumi. Tapi karena satelit mengalami medan gravitasi lebih lemah di angkasa luar, waktu juga mencepat, disebabkan oleh relativitas umum. Dengan demikian, jam satelit akan melambat (akibat relativitas khusus) ataupun mencepat (akibat relativitas umum), tergantung pada jarak satelit dari Bumi. Kenyataannya, pada jarak tertentu dari Bumi, kedua efek akan persis saling menetralkan, dan jam di satelit akan berjalan pada kecepatan yang sama dengan jam di Bumi.

400 *"Setiap kali kita menatap langit dengan suatu cara baru, kita menyaksikan alam semesta baru." Newsday,* 17 Sep. 2002, hal. A46.

402 *Atas penelitian tersebut, mereka memenangkan Hadiah Nobel fisika pada 1993. Newsday,* 17 Sep. 2002, hal. A47.

404 *"Bayangkan seandainya Bumi sehalus itu. Rata-rata gunung..."* Bartusiak, hal. 152.

404 *"Kebanyakan insinyur sistem kendali berhenti bicara ketika mendengar..."* Bartusiak, hal. 158–159.

404 *"Terasa seperti gemuruh..."* Bartusiak, hal. 154.

405 *Masing-masing instrumen optik sensitif memiliki sistem isolasi seismik sendiri...* Bartusiak, hal. 158.

405 *Secara keseluruhan, biaya konstruksi final LIGO akan mencapai $292 juta...* Bartusiak, hal. 150.

406 *"Anda beranjak dari..."* Bartusiak, hal. 169.

406 *"Orang-orang memperoleh kesenangan dari memecahkan tantangan teknis ini..."* Bartusiak, hal. 170.

406 *"Dengan LIGO II, kesempatannya jauh lebih baik..."* Bartusiak, hal. 171.

407 *Jika semuanya berjalan sesuai rencana...* Radiasi kosmik latar yang terukur oleh satelit WMAP berasal dari 379.000 tahun setelah *big bang*, sebab saat itulah atom-atom mulai berkondensasi untuk pertama kalinya setelah ledakan awal tersebut. Sedangkan gelombang gravitasi yang terdeteksi oleh LISA berasal dari waktu ketika gravitasi pertama kali mulai berpisah dari gaya-gaya lain, yang berlangsung dekat jenak *big bang* sendiri. Karenanya, beberapa fisikawan percaya bahwa LISA akan mampu memverifikasi atau menyingkirkan banyak teori yang diajukan hari ini, termasuk teori string.

409 *"Separuh dari defleksi ini dihasilkan oleh medan tarikan matahari*

Newtonian...” Scientific American, November 2001, hal. 66.

409 *“tak ada banyak harapan untuk mengobservasi fenomena ini...”* Petters, hal. 7, 11.

409 *Lebih dari 40 tahun kemudian, pada 1979, bukti parsial pertama... Scientific American*, November 2001, hal. 68.

410 *Hari ini, cincin Einstein merupakan senjata penting... Scientific American*, November 2001, hal. 68.

411 *Sejak saat itu, sekitar seratus busur galaktik... Scientific American*, November 2001, hal. 70.

412 *Pada 1998, astronom di Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics... Scientific American*, November 2001, hal. 69.

414 *Fisikawan mengestimasi bahwa 1 miliar partikel dark matter... Scientific American*, Maret 2003, hal. 54.

414 *Sejauh ini, eksperimen-eksperimen dengan singkatan seperti UKDMC... Scientific American*, Maret 2003, hal. 55.

415 *“Bila detektor-detektor tersebut betul-betul mencatat dan memverifikasi sinyal...” Scientific American*, Maret 2003, hal. 59.

425 *“Sampai sekarang, Newton mempertahankan kedudukannya.”* www.space.com, 27 Feb. 2003.

427 *“Fisikawan merasa yakin bahwa alam merahasiakan trik baru...” Scientific American*, Juli 2000, hal. 71.

429 *Estimasi atas massa boson Higgs... Scientific American*, Juni 2003, hal. 75.

433 *Tapi Uni Soviet pecah...* Di hari-hari terakhir rapat dengar pendapat mengenai nasib SSC, seorang anggota kongres

mengajukan pertanyaan: apa yang akan kita temukan dengan mesin ini? Sialnya, jawaban yang diberikan adalah boson Higgs. Anda hampir bisa mendengar hadirin bergemuruh: $11 miliar hanya demi satu partikel lain? Salah satu pertanyaan terakhir diajukan oleh Harris W. Fawell (R-Ill.) asal partai Republik, yang bertanya, "Apakah [mesin] ini akan membuat kita menemukan Tuhan?" Don Ritter (R-Penn.) asal partai Republik lalu menambahkan, "Jika mesin ini melakukan hal tersebut, saya akan setuju dan mendukungnya." (Weinberg1, hal. 244). Sialnya, para anggota kongres tidak diberi jawaban persuasif dan meyakinkan oleh fisikawan.

Akibat hal ini serta kekeliruan komunikasi publik lainnya, SSC dibatalkan. Kongres AS telah memberi kita satu miliar dolar untuk menggali lubang untuk mesin. Lalu Kongres membatal-kannya dan memberi kita satu miliar dolar lain untuk menutup lubang. Kongres, dengan kebijaksanaannya, telah memberi kita $2 miliar untuk menggali lubang dan kemudian menutupnya, menjadikannya lubang termahal dalam sejarah.

(Secara pribadi, saya berpikir bahwa fisikawan malang yang menjawab pertanyaan mengenai Tuhan tersebut semestinya mengatakan, "Bapak yang terhormat, kita boleh jadi atau tidak boleh jadi menemukan Tuhan, tapi mesin kita akan membawa kita mendekati [jarak] paling dekat dengan Tuhan dalam batas kemampuan manusia, apapun nama yang Anda kenakan pada tuhan. Itu mungkin dapat mengungkap rahasia perbuatan

teragung-Nya, penciptaan alam semesta.")

436 *"Walaupun agak fantastis, ini merupakan skenario favorit saya untuk mengkonfirmasikan teori string..."* Greene1, hal. 224.

436 *Brian Green mendaftarkan lima kemungkinan contoh...* Greene1, hal. 225.

437 *"Saya yakin..."* Kaku3, hal. 699.

Bab 10: Akhir Segalanya

443 *Hukum pertama menyatakan bahwa jumlah total...* Hukum ini, pada gilirannya, mengandung arti bahwa "mesin gerakan perpetual" yang mengklaim mendapatkan "sesuatu dari kenihilan" tidak dimungkinkan oleh hukum fisika yang dikenal.

444 *"Saya pikir hukum yang menyatakan bahwa entropi selalu meningkat..."* Barrow1, hal. 658.

446 *"The Collapse of the Universe: An Eschatological Study."* Rees1, hal. 194.

447 *"Dengan menyesal, saya harus setuju bahwa dalam kasus ini kita tak dapat melarikan diri..."* Rees1, hal. 198.

452 *Simulasi komputer yang dilakukan di Universitas California, Santa Cruz...* www.sciencedaily.com, 28 Mei 2003; *Scientific American*, Agustus 2003, hal. 84.

453 *"Selama manusia semakin pintar secara lebih cepat dari laju mencerlangnya Matahari..."* Croswell, hal. 231.

454 *"Selama beberapa miliar tahun sebelum Matahari mengembung menjadi raksasa merah..."* Croswell, hal. 232.

455 *Karena bintang kerdil ini akan berbobot 0,55 massa surya saja...* Majalah *Astronomy*, November 2001, hal. 40.

455 *"Alam tidak dirancang untuk membuat kita bahagia."* www.abcnews.com, 24 Jan. 2003.

457 *Mini-black hole seukuran proton dapat memancarkan...* Rees1, hal. 182.

458 *"Dan dengan demikian, akhirnya, setelah 10^{117} tahun..."* Majalah *Discover*, Juli 1987, hal. 90.

462 *"Miliaran tahun silam alam semesta terlampau panas untuk eksisnya kehidupan..." Scientific American*, November 1999, hal. 60–63.

463 *"Keabadian akan menjadi penjara, ketimbang menjadi horison kreatifitas yang menjauh tanpa ujung..." Scientific American*, November 1999, hal. 60–63.

Bab 11: Lari Dari Alam Semesta

469 *"Wormhole, dimensi tambahan, dan komputer quantum..."* Rees3, hal. 182.

473 *Seluruh populasi peradaban tipe I mungkin berdwibahasa dengan cara ini, berbicara bahasa setempat dan bahasa planet.* Ini mungkin berlaku pula pada kebudayaan tipe I. Di banyak negara dunia ketiga, seorang elit yang berbicara bahasa setempat dan bahasa Inggris juga selalu mengikuti budaya dan fashion terbaru di Barat. Peradaban tipe I mungkin secara dwibudaya, dengan kebudayaan planeter yang menjangkau seantero bumi,

berkoeksis dengan kebudayaan dan adat-istiadat lokal. Jadi kebudayaan planeter tidak harus berarti penghancuran kebudayaan lokal.

480 *Jun Jugaku dari Research Institute of Civilization di Jepang bersama koleganya telah menyelidiki... Scientific American*, Juli 2000, hal. 40.

482 *"Asumsikan sebuah koloni tipikal yang berluas 10 tahun-cahaya..." Scientific American*, Juli 2000, hal. 41.

482 *Namun, ini tidak mengesampingkan peradaban yang sedikit melampaui kita dalam hal teknologi... Scientific American*, Juli 2000, hal. 40.

484 *Untuk mencegah fragmentasi alam semesta Carroll semacam itu...* Dyson, hal. 163.

484 *Ketika saya mengingatkannya bahwa hanya ada planet, bintang, dan galaksi...* Menurut pikiran, mungkin terdapat peradaban yang lebih tinggi lagi dari tipe III, yang mengeksploitasi tenaga *dark energy*, yang menyusun 73% kandungan total materi/energi alam semesta. Dalam serial TV *Star Trek*, peradaban demikian memenuhi syarat sebagai Q, sebab tenaga Q menjangkau galaksi-galaksi.

490 *"Mungkin sekali bahwa, meskipun kehidupan kini hanya eksis di Bumi..."* Lightman, hal. 169.

491 *"Jika kita menghabisi diri kita sendiri, kita akan merusak kemampuan sejati kosmik..."* Lightman, hal. 169.

499 *"Apakah ini berarti hukum fisika sungguh-sungguh memperkenan-*

kan kita untuk menciptakan alam semesta baru...” Guth, hal. 255.

513 *“Superperadaban masa depan mungkin ingin memasang...”* Gott, hal. 126.

518 *“Kelihatannya...teori quantum memperkenankan perjalanan waktu pada basis mikroskopis.”* Hawking, hal. 104.

519 *Tiap-tiap sambungan syaraf di otak akan digantikan oleh transistor...* Pada prinsipnya, proses ini bisa dilakukan sambil Anda sadar. Sementara potongan-potongan syaraf dihapus dari otak Anda, jaringan transistor duplikat akan terbentuk untuk menggantikan mereka, ditempatkan di tengkorak robot. Karena transistor mengerjakan fungsi yang sama dengan syaraf yang dihapus, Anda akan sepenuhnya sadar selama prosedur ini. Dengan demikian, setelah operasi selesai, Anda akan mendapati diri Anda dalam tubuh robot silikon-dan-logam.

Bab 12: Di Luar Multiverse

523 *“Pertanyaan di atas semua pertanyaan manusia...”* Kaku2, hal. 334.

525 *“Saya ingin tahu bagaimana Tuhan menciptakan dunia ini...”* Calaprice, hal. 202.

525 *“Sains tanpa agama adalah pincang. Tapi agama tanpa sains adalah buta.”* Calaprice, hal. 213.

525 *“kesulitan ekstrim atau kemustahilan...”* Kowalski, hal. 97.

525 *“Teologi saya sama sekali kacau-balau.”* Ibid.

526 *“Dengan ini kemuliaan Tuhan bertambah besar...”* Croswell, hal. 7.

529 *"Keheningan abadi ruang tak terhingga itu membuat saya takut."* Smoot, hal. 24.

530 *"Seseorang berkata kepada alam semesta..."* Barrow1, hal. 106.

531 *"Jika laju perluasan satu detik setelah big bang..."* Kowalski, hal. 49.

533 *"Suatu kali seseorang berkata..."* Polkinghorne, hal. 66.

533 *"Lima puluh tahun silam, alam semesta umumnya dianggap sebagai mesin..."* Kowalski, hal. 19.

534 *"Tak hanya..."* Kowalski, hal. 50.

534 *"Akan sangat malang..."* Kowalski, hal. 71.

534 *"Alam semesta, bisa dikatakan, eksis untuk memuji dirinya sendiri dan senang akan keindahannya sendiri..."* Kowalski, hal. 71.

537 *Akhirnya, dia memutuskan untuk mengikuti tindakan Harmon...* Chown, hal. 30.

540 *"Semakin alam semesta dapat dipahami, semakin pula ia tidak berarti..."* Weinberg3, hal. 144.

540 *"Dengan atau tanpa agama, orang baik bisa berperilaku baik dan orang jahat bisa berbuat jahat..."* Weinberg2, hal. 231.

540 *"Selama bertahun-tahun saya berselisih riang dalam persoalan filosofis..."* Weinberg2, hal. 43.

540 *"tapi tragedinya tidak ada di naskah; tragedinya adalah bahwa tidak ada naskah."* Weinberg2, hal. 43.

540 *"Di alam semesta berisi gaya-gaya fisikal buta...beberapa orang akan terluka..."* Kowalski, hal. 60.

541 *"Saya tidak percaya bumi diciptakan untuk manusia..."* Lightman,

hal. 340.

542 *"Saya kira pandangan hidup saya..."* Lightman, hal. 377.

542 *"Ya, saya ingin mengatakan bahwa pasti ada maksud..."* Lightman, hal. 409.

542 *"Sedikit-banyak, hukum fisika terlihat analogis dengan..."* Lightman, hal. 409.

542 *"Perasaan saya adalah bahwa dalam agama terdapat hal-hal yang sangat serius..."* Lightman, hal. 248.

543 *Teolog Paul Tillich pernah bilang bahwa fisikawan merupakan satu-satunya ilmuwan...* Weinberg1, hal. 242.

544 *Tuhannya Spinoza yang mengungkapkan Diri-Nya dalam harmoni segala hal yang eksis...* Weinberg1, hal. 245.

545 *"Saya tidak dapat membayangkan Tuhan yang mengganjar dan menghukum objek ciptaan-Nya..."* Kowalski, hal. 24.

545 *"Kita menduga bahwa banyak, dan mungkin sebagian besar, ilmuwan modern..."* Wilczek, hal. 100.

545 *Twain pernah mendefinisikan agama sebagai...* Kowalski, hal. 168.

546 *"Mengapa apel jatuh?..."* Kowalski, hal. 148.

547 *"Mengajukan pertanyaan-pertanyaan tersebut boleh saja..."* Croswell, hal. 127.

Glosarium

Alam semesta de Sitter. Solusi kosmologis persamaan Einstein yang mengembang secara eksponensial. Istilah menonjolnya adalah konstanta kosmologis yang menghasilkan perluasan eksponensial ini. Diyakini bahwa alam semesta ada dalam fase de Sitter selama inflasi, dan bahwa ia telah secara perlahan kembali ke fase de Sitter dalam 7 miliar tahun terakhir, menghasilkan alam semesta yang berakselerasi. Awal-mula perluasan de Sitter ini belum diketahui.

Alam semesta Friedmann. Solusi kosmologis terumum persamaan Einstein yang didasarkan pada alam semesta seragam, isotropik, dan homogen. Ini merupakan solusi yang dinamis, di mana alam semesta bisa mengembang menuju *big freeze*, kolaps menuju *big crunch*, atau berinflasi selamanya, tergantung pada harga Omega dan Lambda.

Aliran Kopenhagen. Aliran yang didirikan oleh Niels Bohr, yang menyatakan bahwa dibutuhkan sebuah pengamatan untuk "mengkolapskan fungsi gelombang" guna menentukan kondisi objek. Sebelum pengamatan dilakukan, sebuah objek eksis dalam semua kemungkinan kondisi, bahkan kondisi yang absurd. Karena kita tidak mengamati kucing mati dan kucing hidup yang eksis secara serempak, Bohr berasumsi bahwa terdapat "dinding" yang memisahkan dunia subatom dari dunia keseharian yang kita amati dengan indera kita. Interpretasi ini telah ditantang lantaran memisahkan dunia quantum dari dunia makroskopis sehari-hari, padahal banyak fisikawan kini

percaya bahwa dunia makroskopis harus pula mematuhi teori quantum. Hari ini, berkat nanoteknologi, ilmuwan bisa memanipulasi atom-atom secara tersendiri, sehingga kita menyadari bahwa tidak ada "dinding" yang memisahkan kedua dunia tersebut. Karenanya, persoalan kucing mengemuka kembali hari ini.

Antigravitasi. Lawan gravitasi, yang bergaya menolak ketimbang menarik. Hari ini, kita menyadari bahwa gaya antigravitasi ini betul-betul eksis, kemungkinan menyebabkan alam semesta untuk berinflasi di permulaan masa, dan sekarang sedang mendorong alam semesta untuk berakselerasi. Namun, gaya antigravitasi ini terlalu kecil untuk diukur di laboratorium, sehingga tidak mempunyai implikasi praktis. Antigravitasi juga dihasilkan oleh materi negatif (yang belum pernah dijumpai di alam).

Antimateri. Lawan materi. Antimateri, pertama kali diprediksikan eksis oleh P. A. M. Dirac, mempunyai muatan yang berlawanan dengan materi biasa, sehingga antiproton mempunyai muatan negatif dan antielektron (positron) mempunyai muatan positif. Ketika bersentuhan, mereka saling menghancurkan. Sejauh ini, antihidrogen merupakan antiatom paling kompleks yang diproduksi di laboratorium. Yang menjadi misteri adalah mengapa alam semesta kita utamanya terbuat dari materi ketimbang antimateri. Jika *big bang* menghasilkan jumlah mereka secara setara, maka mereka semestinya telah saling menghancurkan, dan kita tidak akan eksis.

***Atom smasher* (pemecah atom).** Istilah sehari-hari untuk akselerator partikel, sebuah perangkat yang dipakai untuk menghasil-

kan sorot energi subatom yang bergerak mendekati kecepatan cahaya. Akselerator partikel terbesar adalah LHC, akan dibangun di Jenewa, Swiss.

Baryon. Sebuah partikel seperti proton atau neutron, yang mematuhi interaksi kuat. Baryon adalah sejenis hadron (partikel yang berintekasi kuat). Materi baryon, kini kita ketahui, hanya menyusun fraksi kecil materi di alam semesta dan dikerdilkan oleh *dark matter*.

Batas Chandrasekhar. 1,4 massa surya. Melampaui massa ini, gravitasi bintang kerdil putih adalah sangat besar sehingga akan mengatasi tekanan degenerasi elektron dan menggumalkan bintang, menciptakan supernova. Dengan demikian, semua bintang kerdil putih yang kita amati di alam semesta mempunyai massa kurang dari 1,4 massa surya.

Big bang. Ledakan awal yang menghasilkan alam semesta, melempar galaksi-galaksi meluncur ke semua arah. Ketika alam semesta tercipta, temperaturnya sangat panas, dan densitas material sungguh tinggi. *Big bang* terjadi 13,7 miliar tahun silam, menurut satelit WMAP. *Afterglow* dari *big bang* terlihat hari ini sebagai radiasi gelombang mikro latar. Terdapat tiga "bukti" eksperimental *big bang*: ingsutan merah galaksi-galaksi, radiasi gelombang mikro kosmik latar, dan nukleosintesis unsur-unsur.

Big crunch. Kekolapsan final alam semesta. Jika densitas materi cukup besar (Omega lebih besar dari 1), maka terdapat cukup materi di alam semesta untuk membalikkan perluasan awal dan menyebabkan alam semesta kolaps kembali. Temperatur naik tak terhingga pada

jenak *big crunch*.

Big freeze. Akhir alam semesta ketika ia mendekati nol absolut. *Big freeze* kemungkinan merupakan kondisi akhir alam semesta kita, sebab jumlah Omega dan Lambda diyakini berharga 1,0, dan karenanya alam semesta ada dalam kondisi inflasi. Tidak terdapat cukup materi dan energi untuk membalikkan perluasan awal alam semesta, sehingga ia mungkin akan mengembang selama-lamanya.

Bintang neutron. Bintang kolaps yang terdiri dari massa padat neutron. Biasanya ia berdiameter sekitar 10 sampai 15 mil. Ketika berputar, ia melepaskan energi dengan cara tak teratur, menghasilkan pulsar. Ia merupakan sisa supernova. Jika bintang neutron besar sekali, sekitar 3 massa surya, ia dapat kolaps menjadi *black hole*.

***Black body radiation* (radiasi benda hitam).** Radiasi yang dipancarkan oleh objek panas dalam kesetimbangan termal dengan lingkungannya. Jika kita mengambil sebuah objek yang cekung (*black body*), panaskan ia, lalu tunggu sampai mencapai kesetimbangan termal, dan buat lubang kecil padanya, radiasi yang dipancarkan lewat lubang tersebut adalah radiasi benda hitam. Matahari, korek api panas, dan magma meleleh, semuanya memancarkan radiasi benda hitam. Radiasi tersebut mempunyai ketergantungan frekuensi spesifik yang mudah diukur oleh spektrometer. Radiasi gelombang mikro latar yang memenuhi alam semesta mematuhi rumusan radiasi benda hitam ini, memberikan bukti konkret adanya *big bang*.

Black hole. Sebuah objek yang kecepatan pelariannya setara dengan kecepatan cahaya. Karena kecepatan cahaya merupakan

kecepatan tertinggi di alam semesta, ini berarti tidak ada yang dapat melarikan diri dari *black hole*, sekali suatu objek melintasi horison peristiwanya. *Black hole* bisa beragam ukuran. *Black hole* galaktik, yang bersembunyi di pusat galaksi dan quasar, bisa berbobot jutaan sampai miliaran massa surya. *Black hole* bintang merupakan sisa-sisa bintang mati, mungkin awalnya bermassa 40 kali massa Matahari kita. Kedua tipe *black hole* ini telah diidentifikasi dengan instrumen kita. Mini *black hole* mungkin juga eksis, sebagaimana diprediksikan oleh teori, tapi mereka masih belum terlihat di laboratorium.

***Black hole* Kerr.** Solusi tepat persamaan Einstein yang melambangkan *black hole* berputar. *Black hole* kolaps menjadi singularitas cincin. Objek-objek yang jatuh ke dalam cincin hanya mengalami gaya gravitasi terbatas dan dapat, secara prinsip, jatuh ke alam semesta paralel. Ada alam semesta paralel dalam jumlah tak terhingga untuk *black hole* Kerr, tapi Anda tidak dapat kembali sekali Anda memasuki salah satunya. Masih belum diketahui seberapa stabil *wormhole* di pusat *black hole* Kerr. Terdapat persoalan teoritis dan praktis parah jika mencoba mengarungi *black hole* Kerr.

***Blueshift* (ingsutan biru).** Peningkatan frekuensi cahaya bintang disebabkan adanya ingsutan Doppler (*Doppler shift*). Jika sebuah bintang kuning bergerak ke arah Anda, cahaya akan terlihat sedikit kebiru-biruan. Di angkasa luar, galaksi-galaksi beringsutbiru amat langka. Ingsutan biru juga bisa dihasilkan dengan menyusutkan ruang di antara dua titik lewat gravitasi atau pelengkungan ruang.

Boson. Partikel subatom berpusingan bulat, seperti foton atau

graviton. Baryon dipersatukan dengan fermion lewat supersimetri.

Bran. Kependekan untuk membran. Bran bisa berada di dimensi berapapun hingga sebelas dimensi. Ia merupakan landasan teori-M, kandidat utama *theory of everything*. Jika kita ambil contoh membran sebelas-dimensi, kita memperoleh string sepuluh-dimensi. Oleh karena itu string merupakan bran-satu.

Buih quantum. Distorsi kecil ruang-waktu mirip buih pada level panjang Planck. Jika kita dapat mengintai struktur ruang-waktu pada skala panjang Planck, kita akan melihat gelembung-gelembung kecil dan *wormhole*, dengan tampilan mirip buih.

COBE. Satelit Cosmic Observer Background Explorer, yang barangkali memberikan bukti teori *big bang* paling menentukan dengan mengukur radiasi benda hitam yang dilepaskan oleh bola api awal tersebut. Sejak saat itu hasil temuannya telah sangat disempurnakan satelit WMAP.

Dark energy. Energi ruang angkasa hampa. Pertama kali diperkenalkan oleh Einstein pada 1917 dan kemudian dibuang, energi kenihilan ini kini diketahui sebegai bentuk materi/energi dominan di alam semesta. Asal-usulnya tidak diketahui, tapi ia mungkin pada akhirnya akan mendorong alam semesta menuju *big freeze*. Jumlah *dark energy* berbanding dengan volum alam semesta. Data terakhir menunjukkan bahwa 73% materi/energi alam semesta ada dalam bentuk *dark energy*.

Dark matter. Materi tak terlihat, yang mempunyai bobot tapi tidak berinteraksi dengan cahaya. *Dark matter* biasanya ditemukan di halo

besar sekeliling galaksi. Bobotnya melebihi materi biasa, sebesar faktor 10. *Dark matter* dapat diukur secara tak langsung karena ia menekuk cahaya bintang akibat gravitasinya, serupa dengan cara kaca menekuk cahaya. *Dark matter,* menurut data terakhir, menyusun 23% kandungan total materi/energi alam semesta. Menurut teori string, *dark matter* mungkin terbuat dari partikel subatom, seperti neutralino, yang melambangkan vibrasi tinggi superstring.

Dekoherensi. Ketika gelombang-gelombang tak lagi saling sefase. Dekoherensi bisa dipakai untuk menjelaskan paradoks kucing Schrödinger. Menurut interpretasi *many worlds*, fungsi gelombang kucing mati dan kucing hidup telah berdekoherensi dari satu sama lain dan karenanya tak lagi berinteraksi, sehingga memecahkan persoalan bagaimana seekor kucing berada dalam kondisi mati dan hidup secara serempak. Fungsi gelombang kucing mati dan fungis gelombang kucing hidup eksis secara serempak, tapi mereka tak lagi berinteraksi lantaran telah berdekoherensi. Dokeherensi cukup menjelaskan paradoks kucing tanpa asumsi tambahan, seperti kekolapsan fungsi gelombang.

Densitas kritis. Densitas alam semesta di mana perluasan alam semesta diperseimbangkan di antara perluasan abadi dan kekolapsan kembali. Densitas kritis, diukur dalam satuan tertentu, adalah Omega = 1 (di mana Lambda = 0), di mana alam semesta persis diseimbangkan di antara dua masa depan berlainan, *big freeze* dan *big crunch*. Hari ini, data terbaik dari satelit WMAP mengindikasikan bahwa Omega + Lambda = 1, yang cocok dengan prediksi teori inflasi.

Detektor gelombang gravitasi. Perangkat generasi baru yang mengukur disturbansi kecil akibat gelombang gravitasi lewat sinar laser. Detektor gelombang gravitasi seperti LIGO mungkin segera menemukannya. Detektor gelombang gravitasi bisa dipakai untuk menganalisis radiasi yang dipancarkan sepetriliun detik setelah *big bang*. Detektor gelombang gravitasi LISA yang berbasis antariksa mungkin bahkan akan memberikan bukti eksperimental pertama teori string atau teori lainnya.

Determinisme. Filsafat yang menyatakan bahwa segala sesuatu telah ditetapkan, termasuk masa depan. Menurut mekanika Newtonian, jika kita mengetahui kecepatan dan posisi semua partikel di alam semesta, maka kita pada prinsipnya bisa mengkalkulasi evolusi seluruh alam semesta. Namun, prinsip ketidakpastian telah membuktikan bahwa determinisme tidak tepat.

Deuterium. Nukleus hidrogen berat, terdiri dari satu proton dan satu neutron. Deuterium di angkasa luar utamanya dihasilkan oleh *big bang*, bukan oleh bintang, dan keberlimpahan relatifnya memungkinkan kita untuk mengkalkulasi kondisi awal *big bang*. Keberlimpahan deuterium juga bisa digunakan untuk menyangkal teori *steady state*.

Dimensi. Koordinat atau parameter untuk mengukur ruang dan waktu. Alam semesta familiar kita mempunyai tiga dimensi ruang (panjang, lebar, ketebalan/kedalaman) dan satu dimensi waktu. Dalam teori string dan teori-M, kita membutuhkan sepuluh (sebelas) dimensi untuk menguraikan alam semesta, hanya empat yang dapat diobservasi di laboratorium. Barangkali alasan mengapa kita tidak

melihat dimensi-dimensi lain ini adalah karena mereka tergulung atau vibrasi kita terkurung di permukaan membran.

Efek Casimir. Energi negatif yang dihasilkan oleh dua pelat panjang tak terhingga dan paralel tak bermuatan yang ditempatkan bersebelahan. Partikel-partikel virtual di sebelah luar kedua pelat mengerahkan lebih banyak tekanan daripada partikel di antara pelat, dan karenanya pelat-pelat saling tertarik. Efek kecil ini telah diukur di laboratorium. Efek Casimir bisa digunakan sebagai energi untuk menggerakkan mesin waktu atau *wormhole*, jika energinya cukup besar.

Efek Doppler. Perubahan frekuensi gelombang, saat objek mendekati atau menjauhi Anda. Jika sebuah bintang bergerak ke arah Anda, frekuensi cahayanya meningkat, sehingga bintang kuning terlihat sedikit kebiru-biruan. Jika bintang bergerak menjauhi Anda, frekuensi cahayanya menurun, sehingga bintang kuning terlihat sedikit kemerah-merahan. Perubahan frekuensi cahaya ini juga bisa dihasilkan dengan meluaskan ruang sendiri di antara dua titik, sebagaimana di alam semesta mengembang. Dengan mengukur besaran pergeseran frekuensi, Anda bisa mengkalkulasi kecepatan bintang menjauhi Anda.

Eksperimen Einstein-Podolsky-Rosen (EPR). Sebuah eksperimen yang dirancang untuk membantah teori quantum tapi sebetulnya menunjukkan bahwa alam semesta bersifat nonlokal. Jika sebuah ledakan melemparkan dua foton koheren ke arah berlawanan, dan jika pusingan terpertahankan, maka pusingan salah satu foton

berlawanan dengan pusingan foton lain. Karenanya, dengan mengukur pusingan yang satu, Anda otomatis mengetahui pusingan yang lain, kendati partikel lain berada di sisi lain alam semesta. Oleh sebab itu informasi menyebar lebih cepat daripada cahaya. (Namun, tak ada informasi berguna, misalnya pesan, yang bisa dikirim dengan cara ini.)

Elektron. Partikel subatom bermuatan negatif yang mengelilingi nukleus atom. Jumlah elektron yang mengelilingi nukleus menentukan sifat kimiawi atom.

Elektron volt (eV). Energi yang dikumpulkan elektron dengan jatuh ke daya satu volt. Secara perbandingan, reaksi kimawi normalnya menggunakan energi yang diukur dalam beberapa eV atau kurang, sedangkan reaksi nuklir menggunakan ratusan juta eV. Reaksi nuklir melibatkan penyusunan ulang cangkang nukleus. Hari ini, akselerator partikel kita dapat menghasilkan partikel-partikel berenergi miliaran sampai triliunan eV.

Energi negatif. Energi yang kurang dari nol. Materi mempunyai energi positif, gravitasi mempunyai energi negatif, dan keduanya bisa menetralkan dalam banyak model kosmologis. Teori quantum memperkenankan energi negatif jenis lain—akibat efek Casimir dan efek lainnya—yang bisa dipakai untuk menggerakkan *wormhole*. Energi negatif berguna dalam menciptakan dan menstabilkan *wormhole*.

Energi Planck. 10^{19} miliar eV. Ini mungkin merupakan skala energi *big bang*, di mana semua gaya menyatu dalam supergaya tunggal.

Entropi. Ukuran ketidakteraturan atau kekacau-balauan. Menurut hukum termodinamika kedua, entropi total di alam semesta selalu meningkat, yang artinya segala sesuatu pasti pada akhirnya mati. Jika diterapkan pada alam semesta, itu berarti alam semesta akan cenderung ke arah kondisi entropi maksimum, seperti misalnya gas seragam dekat nol absolut. Untuk membalikkan entropi di kawasan kecil (seperti kulkas), dibutuhkan penambahan energi mekanis. Tapi untuk kulkas sendiri, entropi totalnya meningkat (inilah mengapa punggung kulkas terasa hangat). Beberapa orang percaya bahwa hukum kedua ini memprediksikan kematian alam semesta.

False vacuum. Kondisi vakum yang tidak mempunyai energi sedikit pun. Kondisi *false vacuum* bisa menjadi salah satu kesimetrian sempurna, mungkin pada jenak *big bang*, jadi kesimetrian ini rusak ketika kita turun ke kondisi energi lebih rendah. Kondisi *false vacuum* bersifat tidak stabil, dan tak terelakkan lagi terjadi transisi menuju *true vacuum*, yang mempunyai energi lebih rendah. Ide *false vacuum* sangat esensial untuk teori inflasi, di mana alam semesta berawal dalam kondisi perluasan de Sitter.

Fermion. Partikel subatom berpusingan setengah-bulat, seperti proton, elektron, neutron, dan quark. Fermion dapat dipersatukan dengan boson lewat supersimetri.

Fisika klasik. Fisika sebelum kehadiran teori quantum, didasarkan pada teori deterministik Newton. Teori relativitas, karena tidak memasukkan prinsip ketidakpastian, termasuk ke dalam fisika klasik. Fisika klasik bersifat deterministik—yakni, kita bisa memprediksi

masa depan berdasarkan gerakan semua partikel pada saat ini.

Fluktuasi quantum. Variasi kecil teori klasik Newton atau Einstein, akibat prinsip ketidakpastian. Alam semesta sendiri mungkin berawal sebagai fluktuasi quantum di kenihilan (*hyperspace*). Fluktuasi quantum dalam *big bang* memberi kita gugus galaksi hari ini. Persoalan pada gravitasi quantum, yang telah menghalangi *unified field theory* selama berdekade-dekade, adalah bahwa fluktuasi quantum teori gravitasi bersifat tak terhingga, sesuatu yang tak masuk akal. Sejauh ini, hanya teori string yang bisa membuang fluktuasi quantum gravitasi yang tak terhingga ini.

Foton. Partikel atau quantum cahaya. Foton pertama kali diusulkan oleh Einstein untuk menjelaskan efek fotoelektrik—yakni, fakta bahwa penyorotan cahaya ke logam menghasilkan penyemburan elektron.

Fungsi gelombang. Gelombang yang mengiringi setiap partikel subatom. Ini merupakan uraian matematis gelombang probabilitas untuk menemukan posisi suatu partikel. Schrödinger adalah orang pertama yang menuliskan persamaan untuk fungsi gelombang elektron. Menurut teori quantum, materi tersusun dari partikel titik, tapi probabilitas untuk menemukan partikel ditentukan oleh fungsi gelombangnya. Dirac kemudian mengajukan fungsi gelombang yang memasukkan relativitas khusus. Hari ini, semua fisika quantum, termasuk teori string, dirumuskan dari segi gelombang ini.

Fusi. Proses penggabungan proton-proton atau nukelus ringan lain sehingga membentuk nukelus lebih tinggi, melepaskan energi dalam proses tersebut. Fusi hidrogen menjadi helium menghasilkan energi

bintang sekuens utama, seperti Matahari kita. Fusi unsur-unsur ringan dalam *big bang* memberi kita keberlimpahan relatif unsur ringan, seperti helium.

Galaksi. Kumpulan besar bintang-bintang, biasanya mengandung kurang-lebih 100 miliar bintang. Galaksi terdapat beberapa jenis, mencakup elips, spiral (spiral normal dan spiral berpalang), dan ireguler. Galaksi kita bernama galaksi Bima Sakti.

Gaya elektromagnet. Gaya listrik dan magnetisme. Ketika bervibrasi secara berbarengan, mereka menghasilkan sebuah gelombang yang dapat melukiskan radiasi ultraviolet, radio, sinar gamma, dan sebagainya, yang mematuhi persamaan Maxwell.

Gaya nuklir kuat. Gaya yang mengikat nukleus. Ini merupakan salah satu dari empat gaya fundamental. Fisikawan menggunakan Kromodinamika Quantum untuk menguraikan interaksi kuat, berdasarkan quark dan gluon dengan kesimetrian $SU(3)$.

Gaya nuklir lemah. Gaya dalam nukleus yang memungkinkan peluruhan nuklir. Gaya ini tidak cukup kuat untuk menjaga kesatuan nukleus, karenanya nukleus bisa pecah. Gaya lemah mempengaruhi lepton (elektron dan neutrino) dan diangkut oleh boson W dan boson Z.

Gelombang gravitasi. Gelombang gravitasi, yang diprediksi oleh teori relativitas umum Einstein. Gelombang ini telah diukur secara tak langsung dengan memperhatikan penuaan pulsar-pulsar berotasi di sekeliling satu sama lain.

***Grand Unified Theory* (GUT).** Teori yang menyatukan interaksi

lemah, kuat, dan elektromagnet (tanpa gravitasi). Kesimetrian teori-teori GUT, seperti $SU(5)$, mencampur quark dan lepton. Dalam teori ini proton tidak stabil dan bisa meluruh menjadi positron. Teori-teori GUT bersifat tidak stabil (kecuali jika seseorang menambahkan supersimetri). Teori GUT juga tidak memasukkan gravitasi. (Menambahkan gravitasi pada teori GUT membuatnya berdivergensi tak terhingga).

Gravitasi quantum. Bentuk gravitasi yang mematuhi prinsip quantum. Ketika gravitasi diquantisasikan, kita menemukan paket gravitasi, yang disebut graviton. Biasanya, ketika gravitasi diquantisasikan, kita mendapati fluktuasi quantumnya tak terhingga, yang menjadikan teori ini tak berguna. Saat ini, teori string merupakan satu-satunya kandidat yang dapat menyingkirkan ketakterhinggaan ini.

Graviton. Partikel subatom taksiran yang merupakan quantum gravitasi. Graviton mempunyai pusingan 2. Ia terlalu kecil untuk dilihat di laboratorium.

Horison. Titik terjauh yang bisa Anda lihat. Di sekeliling *black hole* terdapat bulatan gaib, dengan radius Schwarzschild, yaitu *point of no return*.

Horison peristiwa. *Point of no return* di sekeliling *black hole*, sering disebut horison. Dahulu diyakini sebagai singularitas gravitasi tak terhingga, tapi ini terbukti merupakan artefak koordinat yang dipakai untuk menggambarkannya.

Hukum kekekalan. Hukum yang menyatakan bahwa kuantitas tertentu tak pernah berubah seiring waktu. Contohnya, hukum

kekekalan materi dan energi mempostulatkan bahwa jumlah total materi dan energi di alam semesta adalah tetap.

Hyperspace. Dimensi lebih tinggi dari kita. Teori string (teori-M) memprediksi bahwa pasti terdapat sepuluh (sebelas) dimensi *hyperspace*. Saat ini, tidak ada data eksperimen yang mengindikasikan eksistensi dimensi lebih tinggi ini, yang mungkin terlalu kecil untuk diukur.

Inflasi. Teori yang menyatakan bahwa alam semesta mengalami perluasan superliminal besar di jenak kelahirannya. Inflasi dapat memecahkan persoalan keflatan, persoalan monokutub, dan persoalan horison.

Inflasi *chaos*. Sebuah versi inflasi, diajukan oleh Andrei Linde, di mana inflasi terjadi secara serampangan. Ini berarti alam semesta bisa berpucuk dari alam semesta lain secara *chaos* dan terus-menerus, menghasilkan multiverse. Inflasi *chaos* merupakan satu cara untuk memecahkan persoalan inflasi berujung, sebab sekarang kita punya generasi acak semua tipe alam semesta berinflasi.

Interferensi. Percampuran dua gelombang yang fase atau frekuensinya sedikit berbeda, menghasilkan pola interferensi khas. Dengan menganalisis pola ini, seseorang dapat mendeteksi perbedaan kecil di antara dua gelombang yang berselisih sangat kecil.

Interferometri. Proses penggunaan interferensi gelombang cahaya untuk mendeteksi perbedaan kecil pada gelombang dari dua sumber berlainan. Interferometri bisa dipakai untuk mengukur kehadiran gelombang gravitasi dan objek lain yang normalnya sulit dideteksi.

Isotop. Bahan kimiawi yang mempunyai jumlah proton yang sama dengan unsur tapi jumlah neutronnya berbeda. Isotop mempunyai sifat kimiawi yang sama tapi beratnya berbeda.

Jembatan Einstein-Rosen. *Wormhole* yang terbentuk dengan menggabungkan dua solusi *black hole.* Mulanya, solusi ini dimaksudkan untuk menggambarkan partikel subatom, seperti elektron, dalam *unified field theory*-nya Einstein. Sejak saat itu, ini telah dipakai untuk menjelaskan ruang-waktu dekat pusat *black hole.*

Kerusakan kesimetrian. Kerusakan kesimetrian ditemukan dalam teori quantum. Diyakini bahwa alam semesta berada dalam kesimetrian sempurna sebelum *big bang.* Sejak saat itu, alam semesta telah mendingin dan menua, dan karenanya empat gata fundamental dan kesimetrian mereka rusak. Hari ini, alam semesta rusak mengerikan, dengan semua gaya yang berpisah dari satu sama lain.

Kesimetrian. Perombakan atau penyusunan ulang sebuah objek yang tidak menghasilkan perubahan, atau tetap sama. Kepingan salju tidak berubah di bawah rotasi kelipatan 60 derajat. Lingkaran tidak berubah di bawah rotasi berapa derajat pun. Model quark tidak berubah di bawah perombakan tiga quark, menghasilkan kesimetrian $SU(3)$. String tidak berubah di bawah supersimetri dan juga di bawah deformasi konformal permukaannya. Kesimetrian sangat krusial dalam fisika sebab membantu menyingkirkan banyak divergensi yang dijumpai dalam teori quantum.

Kompaktifikasi. Proses penggulungan atau pembungkusan dimensi ruang dan waktu yang tak diinginkan. Karena teori string

eksis di *hyperspace* sepuluh-dimensi, dan kita tinggal di dunia 4-dimensi, kita harus membungkus enam dari sepuluh dimensi yang ada menjadi sebuah bola sedemikian kecil sehingga atom-atom sekalipun tidak dapat lari ke dalamnya.

Konstanta Hubble. Kecepatan galaksi beringsutmerah dibagi dengan jaraknya. Konstanta Hubble mengukur laju perluasan alam semesta, dan kebalikannya berhubungan dengan umur alam semesta. Semakin rendah konstanta Hubble, semakin tua alam semesta. Satelit WMAP menempatkan konstanta Hubble pada 71 km/detik per juta parsec, atau 21,8 km/detik per juta tahun-cahaya, mengakhiri kontroversi berdekade-dekade.

Kurva mirip-waktu tertutup. Ini adalah jalur-jalur yang menuju ke masa lalu, menurut Einstein. Mereka tidak diperkenankan dalam relativitas khusus, tapi diperkenankan dalam relativitas umum jika kita mempunyai konsentrasi energi positif atau negatif yang cukup besar.

Lambda. Konstanta kosmologis, yang mengukur jumlah *dark energy* di alam semesta. Saat ini, data mendukung Omega + Lambda = 1, yang cocok dengan prediksi inflasi untuk alam semesta flat. Lambda, yang pernah dianggap berharga nol, kini diketahui menentukan nasib akhir alam semesta.

Laser. Perangkat untuk menghasilkan radiasi cahaya koheren. "Laser" merupakan singkatan dari "Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation". Pada prinsipnya, satu-satunya yang membatasi energi yang termuat dalam sinar laser adalah stabilitas

material lasing dan sumber tenaga.

Lepton. Partikel yang berinteraksi lemah, seperti elektron dan neutrino, dan generasi tingginya, seperti muon. Fisikawan percaya bahwa semua materi tersusun dari hadron (partikel yang berinteraksi kuat) dan lepton (partikel yang berinteraksi lemah).

Lensa dan cincin Einstein. Distorsi optis cahaya bintang saat ia melintasi ruang antargalaksi akibat gravitasi. Gugus-gugus galaksi jauh sering mempunyai penampilan mirip cincin. Lensa Einstein bisa dipakai untuk mengkalkulasi banyak pengukuran penting, termasuk kehadiran *dark matter* dan bahkan harga Lambda dan konstanta Hubble.

LHC. Large Hadron Collider, akselerator partikel untuk menghasilkan sorot proton energetik, berbasis di Jenewa, Swiss. Ketika nanti rampung, ia akan menubrukkan partikel-partikel dengan energi yang belum pernah disaksikan sejak *big bang*. Diharapkan partikel dan spartikel Higgs akan ditemukan oleh LHC setelah beroperasi pada 2007.

LIGO. Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory, berbasis di negara bagian Washington dan Louisiana, merupakan detektor gelombang gravitasi terbesar di dunia. Ia beroperasi online pada 2003.

Lilin standar. Sumber cahaya yang terstandarisasi dan sama di sepanjang alam semesta, yang memungkinkan ilmuwan untuk mengkalkulasi jarak astronomis. Semakin redup sebuah lilin standar, semakin jauh ia. Sekali kita mengetahui keberkilauan lilin standar,

kita bisa mengkalkulasi jaraknya. Lilin standar yang digunakan hari ini adalah supernova tipe Ia dan variabel Cepheid.

LISA. Laser Interferometry Space Antenna adalah tiga rangkaian satelit antariksa yang menggunakan sinar laser untuk mengukur gelombang gravitasi. Ia akan cukup sensitif untuk mengkonfirmasi atau menyangkal teori inflasi dan bahkan mungkin teori string, ketika diluncurkan beberapa dekade lagi.

Lompatan quantum. Perbuahan mendadak status objek yang secara klasik tidak diperbolehkan. Elektron-elektron di dalam sebuah atom membuat lompatan quantum di antara orbit-orbit, melepaskan atau menyerap cahaya dalam proses tersebut. Alam semesta mungkin membuat lompatan quantum dari kenihilan menjadi alam semesta kita hari ini.

MACHO. Massive Compact Halo Object. Ini adalah bintang, planet, dan asteroid gelap, dan semacamnya yang sulit dideteksi oleh teleskop optis dan mungkin menyusun seporsi *dark matter*. Data mutakhir mengindikasikan bahwa bagian terbesar *dark matter* adalah nonbaryon dan bukan tersusun dari MACHO.

Manifold Calabi-Yau. Ruang sepuluh-dimensi yang dijumpai ketika kita mengambil string sepuluh-dimensi dan menggulung atau mengkompaktifikasi enam dimensi menjadi bola kecil, menghasilkan ruang empat-dimensi supersimetris. Ruang Calabi-Yau merupakan *multiply connected*—yakni, mereka mempunyai lubang, yang dapat menentukan jumlah generasi quark yang eksis di ruang 4-dimensi kita. Mereka sangat penting dalam teori string karena banyak dari fitur-

fitur manifold ini, misalnya jumlah lubang yang mereka punya, dapat menentukan jumlah quark yang ada di alam semesta 4-dimensi kita.

Materi eksotis. Bentuk materi baru berenergi negatif. Ini berbeda dari antimateri, yang mempunyai energi positif. Materi negatif mempunyai antigravitasi, sehingga ia akan jatuh ke atas bukan ke bawah. Bila eksis, ia bisa digunakan untuk menggerakkan mesin waktu. Namun, tak satu pun yang pernah ditemukan.

Medan Higgs. Medan yang merusak kesimetrian teori-teori GUT ketika melakukan transisi dari *false vacuum* menuju *real vacuum*. Medan Higgs merupakan sumber massa dalam teori GUT dan juga bisa dipakai untuk mendorong inflasi. Fisikawan berharap bahwa LHC akhirnya akan menemukan medan Higgs.

Mekanika quantum. Teori quantum lengkap yang diajukan pada 1925, yang menggantikan "teori quantum lama" Planck dan Einstein. Berbeda dari teori quantum lama, yang merupakan gabungan konsep klasik lama dan gagasan quantum baru, mekanika quantum didasarkan pada persamaan gelombang dan prinsip ketidakpastian dan mewakili pemutusan signifikan dari fisika klasik. Belum pernah ditemukan penyimpangan dari mekanika quantum di laboratorium. Versi termajunya hari ini disebut teori medan quantum, yang mengkombinasikan relativitas khusus dan mekanika quantum. Namun teori gravitasi yang bersifat mekanis quantum sepenuhnya adalah luar biasa sulit.

Membran. Permukaan mengulur, di dimensi manapun. Bran-nol adalah partikel titik. Bran-satu adalah string. Bran-dua adalah

membran. Membran merupakan fitur esensial teori-M. String bisa dipandang sebagai membran dengan satu dimensi yang dikompaktifikasi.

Monokutub. Kutub magnet tunggal. Biasanya, magnet memiliki pasangan kutub utara dan selatan yang tak terpisahkan, sehingga monokutub belum pernah terlihat di laboratorium. Monokutub semestinya terbentuk dalam jumlah sangat banyak saat *big bang*, tapi hari ini kita tidak dapat menemukannya satu pun, barangkali karena inflasi mengurangi jumlah mereka.

Multiply connected space. Ruang di mana laso atau simpal tidak dapat terus-menerus disusutkan hingga suatu titik. Contoh, sebuah simpal yang melilit permukaan lubang donat tidak dapat dikontraksikan hingga suatu titik, karenanya donat merupakan *multiply connected*. *Wormhole* adalah contoh *multiply connected space*, sebab laso tidak dapat dikontraksikan di sekeliling leher *wormhole*.

Multiverse. Alam semesta berlipat ganda. Pernah dianggap sangat spekulatif, hari ini konsep multiverse dianggap esensial untuk memahami alam semesta awal. Terdapat beberapa bentuk multiverse yang semuanya terkait erat. Setiap teori quantum memiliki multiverse status quantum. Diterapkan pada alam semesta, itu berarti pasti terdapat alam semesta dalam jumlah tak terhingga yang telah saling berdekoherensi. Teori inflasi memperkenalkan multiverse untuk menjelaskan proses bagaimana inflasi dimulai dan kemudian berhenti. Teori string memperkenalkan multiverse lantaran banyaknya solusi potensial yang dimilikinya. Menurut teori-M, alam semesta-

alam semesta ini mungkin sebetulnya saling bertubrukan. Dengan landasan filosofis, seseorang memperkenalkan multiverse untuk menjelaskan prinsip antropik.

Muon. Partikel subatom yang identik dengan elektron tapi mempunyai massa jauh lebih besar. Ia termasuk ke dalam partikel generasi redundan kedua yang dijumpai dalam Standard Model.

Neutron. Partikel subatom netral yang, bersama proton, menyusun nukleus atom.

Neutrino. Partikel subatom remang-remang yang hampir tak bermassa. Neutrino bereaksi sangat lemah dengan partikel lain dan dapat mempenetrasi timah setebal beberapa tahun-cahaya tanpa pernah berinteraksi dengan apapun. Mereka dipancarkan dalam jumlah sangat banyak dari supernova. Jumlah neutrino begitu banyak sehingga mereka memanaskan gas di sekeliling bintang kolaps, sehingga menghasilkan ledakan supernova.

Nukleosintesis. Pembentukan nukleus yang lebih tinggi dari hidrogen, berawal dari *big bang*. Dengan cara ini, seseorang bisa memperoleh keberlimpahan relatif semua unsur yang dijumpai di alam. Ini merupakan salah satu dari tiga "bukti" *big bang*. Unsur-unsur lebih tinggi dimasak di pusat bintang-bintang. Unsur-unsur di luar besi dimasak dalam ledakan supernova.

Nukleus. Inti kecil sebuah atom, terdiri dari proton dan neutron, berdiameter kira-kira 10^{-13} cm. Jumlah proton di nukleus menentukan jumlah elektron di cangkang sekeliling nukleus, yang pada gilirannya menentukan sifat kimiawi atom.

Omega. Parameter yang mengukur densitas rata-rata materi di alam semesta. Jika Lambda = 0, dan Omega kurang dari 1, maka alam semesta akan mengembang selamanya menuju *big freeze*. Jika Omega lebih dari 1, maka terdapat cukup materi untuk membalikkan perluasan tersebut menuju *big crunch*. Jika Omega sama dengan 1, maka alam semesta adalah flat.

Pangkat sepuluh. Notasi pendek yang digunakan oleh ilmuwan untuk menunjukkan bilangan yang amat besar atau amat kecil. Jadi, 10^n artinya 1 diikuti dengan nol *n*. Dengan demikian seribu sama dengan 10^3. Juga, 10-*n* artinya kebalikan dari 10^n—yakni, 000...001, di mana terdapat nol sebanyak *n*-1. Dengan demikian seperseribu sama dengan 10^{-3} atau 0,001.

Panjang Planck. 10^{-33} cm. Ini adalah skala yang dijumpai saat *big bang* di mana gaya gravitasi sama kuatnya dengan gaya lain. Pada skala ini, ruang-waktu menjadi "berbuih", dengan gelembung-gelembung kecil dan *wormhole* yang muncul dan menghilang menuju kevakuman.

Paradoks kucing Schrödinger. Paradoks yang menanyakan apakah seekor kucing bisa mati dan hidup pada waktu yang sama. Menurut teori quantum, seekor kucing dalam kotak bisa mati dan hidup secara bersamaan, setidaknya sampai kita melakukan pengamatan, yang terdengar absurd. Kita harus menambahkan fungsi gelombang kucing dalam semua kemungkinan kondisi (mati, hidup, berlari, tidur, makan, dan sebagainya) sampai pengukuran dilakukan. Terdapat dua cara utama untuk memecahkan paradoks ini, yakni

mengasumsikan bahwa kesadaran menentukan eksistensi atau mengasumsikan adanya dunia paralel yang tak terhingga.

Paradoks leluhur. Dalam kisah-kisah perjalanan waktu, paradoks ini muncul ketika Anda mengubah masa lalu, menjadikan masa kini mustahil. Jika Anda pergi ke masa lalu dan membunuh orangtua Anda sebelum Anda lahir, maka eksistensi Anda adalah mustahil. Paradoks ini bisa dipecahkan dengan menetapkan *self-consistency*, jadi Anda dapat bepergian ke masa lalu tapi tidak bisa mengubahnya sewenang-wenang, atau dengan mengasumsikan adanya alam semesta paralel.

Paradoks Olbers. Paradoks yang menanyakan mengapa langit malam berwarna hitam. Jika alam semesta adalah tak terhingga dan seragam, maka kita seharusnya menerima cahaya dari bintang yang tak terhingga jumlahnya, dan karenanya langit malam pasti putih, yang melanggar observasi. Paradoks ini dijelaskan oleh *big bang* dan masa hidup bintang yang terbatas. *Big bang* memberi jalan pintas kepada cahaya yang mengenai mata kita dari angkasa jauh.

Partikel virtual. Partikel yang secara singkat muncul dan menghilang dari kevakuman. Mereka melanggar hukum kekekalan yang dikenal tapi selama periode waktu yang singkat saja, lewat prinsip ketidakpastian. Dengan demikian, hukum kekekalan, sebagaimana rata-rata, beroperasi di kevakuman. Partikel virtual terkadang bisa menjadi partikel riil jika ditambahkan cukup energi kepada kevakuman. Pada skala mikroskopis, partikel-partikel virtual ini mencakup *wormhole* dan bayi alam semesta.

Penguapan *black hole*. Radiasi yang menembus keluar dari *black*

hole. Terdapat probabilitas kecil tapi dapat dihitung bahwa radiasi akan secara lemah-lembut merembes dari *black hole*, yang disebut penguapan. Akhirnya, begitu banyak energi *black hole* yang akan pergi lewat penguapan quantum sehingga ia berhenti eksis. Radiasi ini terlampau lemah untuk diobservasi secara eksperimen.

Penyetelan halus. Penyesuaian parameter tertentu hingga akurasi luar biasa. Fisikawan tidak menyukai penyetelan halus, menganggapnya artifisial dan dipaksakan, dan mencoba mengadakan prinsip fisika untuk menyingkirkan kebutuhan akan penyetelan halus. Contohnya, penyetelan halus yang diperlukan untuk menjelaskan alam semesta flat dapat dijelaskan oleh inflasi, dan penyetelan halus yang diperlukan untuk memecahkan persoalan hirarki dalam teori GUT dapat dipecahkan menggunakan supersimetri.

Peradaban tipe I, II, III. Klasifikasi yang diperkenalkan oleh Nikolai Kardashev untuk menggolongkan peradaban di luar angkasa berdasarkan produksi energi mereka. Mereka disamakan dengan peradaban yang dapat memanfaatkan tenaga planet (tipe I), bintang (tipe II), dan galaksi (tipe III). Sejauh ini, tidak ada bukti keberadaan mereka di ruang angkasa. Peradaban kita sendiri barangkali sama dengan peradaban tipe 0,7.

Persamaan Maxwell. Persamaan fundamental untuk cahaya, pertama kali dituliskan oleh James Clerk Maxwell pada 1860-an. Persamaan-persamaan ini menunjukkan bahwa medan listrik dan magnet bisa berubah menjadi satu sama lain. Maxwell menunjukkan bahwa meda-mdean ini berubah menjadi satu sama lain dalam

gerakan mirip gelombang, menciptakan medan elektromagnet yang bergerak pada kecepatan cahaya. Maxwell kemudian membuat penaksiran berani bahwa ini adalah cahaya.

Persoalan hirarki. Percampuran tak diinginkan yang terjadi antara fisika *low-energy* dan fisika panjang Planck dalam teori-teori GUT, menjadikan teori tersebut tak berguna. Persoalan hirarki bisa dipecahkan dengan menambahkan supersimetri.

Persoalan horison. Misteri mengapa alam semesta begitu seragam tak peduli ke manapun kita memandang. Bahkan kawasan-kawasan langit malam di sisi-sisi horison berlawanan bersifat seragam, ini aneh sebab mereka tidak mungkin pernah berkontak termal di permulaan masa (karena cahaya mempunyai kecepatan terbatas). Ini bisa dijelaskan jika *big bang* mengambil bidang seragam kecil dan kemudian menginflasikannya menjadi alam semesta hari ini.

Persoalan keflatan. Penyetelan halus yang diperlukan untuk menghasilkan alam semesta flat. Agar Omega kurang-lebih sama dengan **1**, alam semesta harus disetel halus hingga akurasi luar biasa pada jenak *big bang*. Eksperimen-eksperimen mutakhir menunjukkan bahwa alam semesta adalah flat, jadi ia disetel halus saat *big bang*, atau barangkali alam semesta berinflasi, yang memflatkannya.

Planet ekstrasurya. Planet yang mengorbit bintang selain bintang kita. Lebih dari seratus planet demikian kini telah terdeteksi, dengan angka sekitar dua penemuan setiap sebulan. Sebagian besar dari mereka, sialnya, mirip Yupiter dan tidak menguntungkan untuk pembentukan kehidupan. Dalam beberapa dekade, akan dikirim

satelit-satelit ke luar angkasa yang akan mengidentifikasi planet-planet ekstrasurya mirip Bumi.

Prinsip Antropik. Prinsip yang menyatakan bahwa konstanta-konstanta alam disetel untuk memperkenankan kehidupan dan keberakalan. Prinsip antropik kuat menyimpulkan bahwa suatu jenis kecerdasan dibutuhkan untuk menyetel konstanta fisikal guna memperkenankan keberakalan. Prinsip antropik lemah hanya menyatakan bahwa konstanta alam pasti disetel untuk memperkenankan keberakalan (kalau tidak, kita tidak akan ada di sini), tapi itu menyisakan pertanyaan tentang apa atau siapa yang melakukan penyetelan tersebut. Secara eksperimen, kita menemukan bahwa, memang, konstanta alam terlihat disetel halus untuk memperkenankan kehidupan dan bahkan kesadaran. Beberapa orang percaya bahwa ini merupakan tanda adanya pencipta kosmik. Yang lainnya percaya bahwa ini merupakan tanda adanya multiverse.

Prinsip ketidakpastian. Prinsip yang menyatakan bahwa Anda tidak dapat mengetahui lokasi dan kecepatan sebuah partikel dengan presisi tak terhingga. Ketidakpastian posisi partikel, dikalikan dengan ketidakpastian momentumnya, harus lebih besar atau sama dengan konstanta Planck yang dibagi dengan 2π. Prinsip ketidakpastian adalah komponen paling esensial dalam teori quantum, memperkenalkan probabilitas ke dalam alam semesta. Berkat nanoteknologi, fisikawan bisa memanipulasi atom-atom secara tersendiri sekehendak hati dan menguji prinsip ketidakpastian di laboratorium.

Proton. Partikel subatom bermuatan positif yang, bersama neutron,

menyusun nukleus atom. Mereka stabil, tapi teori GUT memprediksi bahwa mereka bisa meluruh setelah periode waktu yang panjang.

Pulsar. Bintang neutron yang berotasi. Karena ireguler, ia menyerupai mercusuar yang berotasi, memberinya tampilan bintang berkedip.

Quark. Partikel subatom yang menyusun proton dan neutron. Tiga quark menyusun satu proton atau neutron, dan satu pasangan quark dan antiquark menyusun satu meson. Quark pada gilirannya merupakan bagian dari Standard Model.

Quasar. Objek quasi-bintang. Mereka adalah galaksi besar yang terbentuk sesaat setelah *big bang*. Mereka mempunyai *black hole* besar di pusatnya. Fakta bahwa hari ini kita tidak melihat quasar merupakan satu cara untuk menyangkal teori *steady state*, yang menyatakan bahwa alam semesta hari ini serupa dengan alam semesta miliaran tahun silam.

Radiasi gelombang mikro latar. Sisa radiasi awal dari *big bang*, dengan temperatur sekitar 2,7 derajat K. Penyimpangan kecil pada radiasi latar ini memberi ilmuwan data berharga yang dapat memverifikasi atau menyingkirkan banyak teori kosmologi.

Radiasi gelombang mikro kosmik latar. Sisa radiasi dari *big bang* yang masih beredar di alam semesta, pertama kali diprediksi pada 1984 oleh George Gamow dan kelompoknya. Temperaturnya adalah 2,7 derajat di atas nol absolut. Penemuannya oleh Penzias dan Wilson memberikan bukti *big bang* yang paling meyakinkan. Hari ini, ilmuwan mengukur penyimpangan kecil dalam radiasi latar ini untuk

menyediakan bukti teori inflasi dan teori lainnya.

Radiasi Hawking. Radiasi yang secara perlahan menguap dari *black hole*. Radiasi ini berbentuk radiasi *black hole*, dengan temperatur spesifik, dan diakibatkan oleh fakta bahwa partikel-partikel quantum dapat mempenetrasi medan gravitasi di sekitar *black hole*.

Radiasi inframerah. Radiasi panas, atau radiasi elektromagnet, yang frekuensinya sedikit di bawah cahaya tampak.

Radiasi koheren. Radiasi yang sefase dengan dirinya sendiri. Radiasi koheren, seperti yang dijumpai pada sinar laser, bisa dibuat berinterferensi dengan dirinya sendiri, menghasilkan pola interferensi yang dapat mendeteksi penyimpangan kecil dalam gerakan atau posisi. Ini berguna dalam interferometer dan detektor gelombang gravitasi.

Radius Schwarzschild. Radius horison peristiwa, atau *point of no return* untuk *black hole*. Untuk Matahari, radius Schwarzschild adalah kira-kira 2 mil. Sekali sebuah bintang termampatkan melampaui horison peristiwanya, ia kolaps menjadi *black hole*.

Raksasa merah. Bintang yang membakar helium. Setelah sebuah bintang seperti Matahari kita kehabisan bahan bakar hidrogennya, ia mulai mengembang dan membentuk bintang raksasa merah pembakar helium. Ini artinya Bumi akhirnya akan mati dalam api ketika Matahari kita menjadi raksasa merah, sekitar 5 miliar tahun dari sekarang.

***Redshift* (ingsutan merah).** Pemerahan atau penurunan frekuensi cahaya dari galaksi-galaksi jauh akibat efek Doppler, mengindikasikan

bahwa mereka sedang menjauhi kita. Ingsutan merah juga bisa terjadi lewat perluasan ruang hampa, sebagaimana di alam semesta mengembang.

Relativitas. Teori Einstein, khusus dan umum. Teori pertama adalah mengenai cahaya dan ruang-waktu flat 4-dimensi. Ia didasarkan pada prinsip bahwa kecepatan cahaya adalah konstan di semua kerangka kelembaman. Teori kedua berurusan dengan gravitasi dan ruang yang melengkung. Ia didasarkan pada prinsip bahwa kerangka yang bergravitasi dan berakselerasi tidak dapat dibedakan. Kombinasi relativitas dengan teori quantum mewakili jumlah total semua pengetahuan fisika.

Relativitas khusus. Teori Einstein tahun 1905, didasarkan pada kekonstanan kecepatan cahaya. Konsekuensinya meliputi: semakin cepat Anda bergerak, maka waktu melambat, massa meningkat, dan jarak menyusut. Di samping itu, materi dan energi dihubungkan lewat $E = mc^2$. Satu konsekuensi relativitas khusus adalah bom atom.

Relativitas umum. Teori gravitasi Einstein. Bukannya merupakan gaya, dalam teori Einstein gravitasi direduksi menjadi produk sampingan geometri, sehingga lengkungan ruang-waktu memberikan ilusi bahwa terdapat gaya tarik yang disebut gravitasi. Ini telah diverifikasi secara eksperimen hingga akurasi lebih dari 99,7% dan memprediksikan eksistensi *black hole* dan alam semesta yang mengembang. Namun teori tersebut harus runtuh di pusat *black hole* atau jenak penciptaan, di mana teori memprediksikan omong kosong. Untuk menjelaskan fenomena-fenomena ini, seseorang terpaksa harus

memakai teori quantum.

Simply connected space. Ruang di mana laso bisa terus-menerus disusutkan hingga suatu titik. Ruang flat merupakan *simply connected*, sementara permukaan donat atau *wormhole* bukan.

Singularitas. Kondisi gravitasi tak terhingga. Dalam relativitas umum, singularitas diprediksi eksis di pusat *black hole* dan di jenak penciptaan, di bawah kondisi yang sangat umum. Ini dianggap melambangkan kegagalan teori relativitas, memaksa pengenalan teori gravitasi quantum.

Spektrum. Warna atau frekuensi berlainan yang ditemukan dalam cahaya. Dengan menganalisis spektrum cahaya bintang, seseorang dapat menetapkan bahwa bintang utamanya terbuat dari hidrogen dan helium.

Standard Model. Teori quantum interaksi lemah, elektromagnet, dan kuat yang paling sukses. Ia didasarkan pada kesimetrian quark $SU(3)$, kesimetrian elektron dan neutrino $SU(2)$, dan kesimetrian cahaya $U(1)$. Ia memuat sekumpulan besar partikel: quark, gluon, lepton, boson W dan boson Z, dan partikel Higgs. Ia tidak bisa menjadi *theory of everything* karena (a) tidak menyebutkan gravitasi; (b) mempunyai sembilan belas parameter bebas yang harus ditetapkan dengan tangan; dan (c) mempunyai tiga generasi quark dan lepton yang identik, yakni redundan. Standard Model bisa diserap ke dalam teori GUT dan akhirnya ke dalam teori string, tapi saat ini tidak ada bukti eksperimen untuk keduanya.

String kosmik. Sisa *big bang*. Beberapa teori standar mempre-

diksikan bahwa beberapa relik *big bang* awal mungkin masih bertahan dalam bentuk string kosmik raksasa yang seukuran galaksi atau lebih besar. Tubrukan dua string kosmik mungkin dapat memperkenankan bentuk perjalanan waktu tertentu.

Supernova. Bintang yang meledak. Mereka begitu energetik sehingga terkadang lebih cerlang daripada galaksi. Terdapat beberapa tipe supernova, yang paling menarik adalah supernova tipe Ia. Mereka semua bisa digunakan sebagai lilin standar untuk mengukur jarak galaksi. Supernova tipe Ia terjadi ketika bintang kerdil putih yang menua mencuri materi dari rekannya dan terdorong melampaui batas Chandrasekhar, menyebabkannya kolaps mendadak dan kemudian meledak.

Supernova tipe Ia. Supernova yang sering dipakai sebagai lilin standar untuk mengukur jarak. Supernova ini berlangsung di sistem bintang ganda, di mana bintang kerdil putih perlahan-lahan mengisap materi dari bintang rekan, mendorong bintang kerdil putih tersebut melampaui batas Chandrasekhar 1,4 massa surya, menyebabkannya meledak.

Supersimetri. Kesimetrian yang menukar tempat fermion dan boson. Kesimetrian ini memecahkan persoalan hirarki, dan ia juga membantu menyingkirkan divergensi yang tersisa dalam teori superstring. Itu artinya semua partikel dalam Standard Model pasti mempunyai partner, disebut spartikel, yang sejauh ini belum pernah terlihat di laboratorium. Supersimetri pada prinsipnya dapat menyatukan semua partikel di alam semesta menjadi objek tunggal.

Tahun-cahaya. Jarak yang ditempuh cahaya dalam satu tahun, atau kira-kira 5,88 triliun mil (9,46 triliun kilometer). Bintang terdekat adalah sekitar 4 tahun-cahaya jauhnya, dan galaksi Bima Sakti berdiameter sekitar 100.000 tahun-cahaya.

Tekanan degenerasi elektron. Pada bintang sekarat, ini merupakan gaya tolak yang mencegah elektron atau neutron kolaps sepenuhnya. Pada bintang kerdil putih, ini berarti gravitasi dapat mengatasi gaya ini jika massa lebih dari 1,4 massa surya. Gaya ini disebabkan oleh prinsip eksklusi Pauli, yang menyatakan bahwa dua elektron tidak bisa menduduki status quantum yang persis sama. Jika gravitasi cukup besar untuk mengatasi gaya ini di bintang kerdil putih, bintang tersebut akan kolaps dan kemudian meledak.

Teleskop Chandra X-ray. Teleskop sinar-X di luar angkasa yang dapat memindai angkasa untuk mencari emisi sinar-X, seperti yang dipancarkan oleh *black hole* atau bintang neutron.

Teori Kaluza-Klein. Teori Einstein yang dirumuskan di lima dimensi. Ketika direduksi ke empat dimensi, kita mendapati teori Einstein berpasangan dengan teori cahaya Maxwell. Dengan demikian, ini merupakan unifikasi penting pertama cahaya dengan gravitasi. Hari ini, teori Kaluza-Klein dimasukkan ke dalam teori string.

Teori-M. Versi teori string paling maju. Teori-M eksis di *hyperspace* sebelas-dimensi, di mana bran-dua dan bran-lima dapat eksis. Ada lima cara di mana teori-M bisa direduksi menjadi sepuluh dimensi, yang memberi kita lima teori superstring, yang kini terungkap sebagai teori yang sama. Persamaan lengkap yang mengatur teori-M tidak

diketahui sama sekali.

Teori *many-worlds*. Teori quantum yang menyatakan bahwa semua kemungkinan alam semesta quantum dapat eksis secara serempak. Ia memecahkan persoalan kucing Schrödinger dengan menyatakan bahwa alam semesta membelah pada setiap titik waktu quantum, dan karenanya kucing tersebut hidup di satu alam semesta tapi mati di alam semesta lain. Belakangan, semakin banyak fisikawan yang menyuarakan dukungan terhadap teori *many-worlds*.

Teori perturbasi. Proses yang dipakai fisikawan untuk memecahkan teori-teori quantum dengan menjumlahkan koreksi kecil yang tak terhingga. Hampir semua penelitian teori string dilakukan lewat teori perturbasi string, tapi beberapa dari persoalan paling menarik tidak terjangkau oleh teori perturbasi, misalnya kerusakan kesimetrian. Jadi, kita membutuhkan metode nonperturbatif untuk memecahkan teori string, yang pada saat ini eksis dengan gaya yang tidak sistematis.

Teori quantum. Teori partikel subatom. Ini merupakan salah satu teori tersukses sepanjang masa. Teori quantum plus relativitas bersama-sama menyusun jumlah total pengetahuan fisika pada level fundamental. Secara kasar, teori quantum didasarkan pada tiga prinsip: (1) energi ditemukan dalam paket-paket tersendiri yang disebut quantum; (2) materi didasarkan pada partikel-partikel titik tapi probabilitas untuk menemukannya ditentukan oleh gelombang, yang mematuhi persamaan gelombang Schrödinger; (3) dibutuhkan pengukuran untuk mengkolapskan gelombang tersebut dan

menentukan kondisi akhir sebuah objek. Postulat-postulat teori quantum merupakan kebalikan postulat relativitas umum, yang bersifat deterministik dan didasarkan pada permukaan halus. Pengkombinasian relativitas dan teori quantum adalah salah satu permasalahan terbesar yang dihadapi fisika hari ini.

Teori *steady state*. Teori yang menyatakan bahwa alam semesta tidak mempunyai permulaan melainkan terus-menerus menghasilkan materi baru selagi ia mengembang, mempertahankan densitas yang sama. Teori ini telah kehilangan kepercayaan dengan berbagai alasan, salah satunya ketika radiasi gelombang mikro latar ditemukan. Di samping itu, ditemukan bahwa quasar dan galaksi mempunyai fase evolusi yang berbeda.

Teori string. Teori yang didasarkan pada string kecil yang bervibrasi, bahwa setiap mode vibrasi dapat ekuivalen dengan partikel subatom. Ini merupakan satu-satunya teori yang dapat mengkombinasikan gravitasi dengan teori quantum, menjadikannya kandidat utama *theory of everything*. Ia hanya konsisten secara matematis di sepuluh dimensi. Versi teranyarnya disebut teori-M, yang ditetapkan di sebelas dimensi.

Teori string heterotik. Teori string paling realistik secara fisika. Kelompok kesimetriannya adalah E(8) × E(8), yang cukup besar untuk memasukkan kesimetrian Standard Model. Lewat teori-M, string heterotik bisa ditunjukkan ekuivalen dengan empat teori string lain.

Termodinamika. Fisika panas/kalor. Ada tiga hukum termodinamika: (1) jumlah total materi dan energi adalah kekal; (2) entropi

total selalu meningkat; dan (3) Anda tidak dapat mencapai nol absolut. Termodinamika sangat esensial untuk memahami bagaimana alam semesta akan mati.

Tunneling. Proses partikel mempenetrasi rintangan yang dilarang oleh mekanika Newtonian. *Tunneling* (penerowongan/penembusan) merupakan penyebab peluruhan alpha radioaktif dan merupakan produk sampingan teori quantum. Alam semesta sendiri mungkin tercipta melalui *tunneling*. Ditaksir bahwa seseorang mungkin dapat ber-*tunneling* di antara alam semesta-alam semesta.

Unified field theory. Teori yang diusahakan oleh Einstein yang akan menyatukan semua gaya alam ke dalam teori koheren tunggal. Hari ini, kandidat utamanya adalah teori string atau teori-M. Einstein percaya bahwa *unified field theory*-nya bisa menggabungkan relativitas dan teori quantum menjadi teori lebih tinggi yang tidak memerlukan probabilitas. Namun, teori string merupakan teori quantum dan karenanya memperkenalkan probabilitas.

Vakum/Kevakuman. Ruang hampa. Tapi ruang hampa, menurut teori quantum, dipenuhi dengan partikel-partikel subatom virtual, yang bertahan sepecahan detik saja. Kevakuman juga digunakan untuk menggambarkan energi terendah sebuah sistem. Alam semesta, diyakini, beralih dari kondisi *false vacuum* ke *true vacuum* masa kini.

Variabel Cepheid. Bintang yang kecerlangannya bervariasi dengan laju yang presisi dan dapat dikalkulasi, dan karenanya bermanfaat sebagai "lilin standar" untuk pengukuran jauh dalam astronomi. Variabel Cepheid sangat menentukan dalam membantu Hubble

mengkalkulasi jarak ke galaksi-galaksi.

***White dwarf* (bintang kerdil putih).** Bintang dalam tahap akhir kehidupannya, tersusun dari unsur-unsur rendah seperti oksigen, lithium, karbon, dan seterusnya. Mereka dijumpai setelah raksasa merah kehabisan bahan bakar heliumnya dan kolaps. Tipikalnya, mereka kira-kira seukuran Bumi dan berbobot tak lebih dari 1,4 massa surya (atau, kalau tidak, mereka akan kolaps).

WIMP. Weakly interacting massive particle. WIMP ditaksir menyusun sebagian besar *dark matter* di alam semesta. Satu kandidat utama WIMP adalah spartikel yang diprediksikan oleh teori string.

Wormhole. Jalan terusan di antara dua alam semesta. Matematikawan menyebut ruang ini sebagai "*multiply connected space*"—ruang di mana laso tidak dapat disusutkan hingga suatu titik. Tidak jelas apakah seseorang bisa melewati *wormhole* tanpa mendestabilkannya atau mati dalam upaya tersebut.

Zona Goldilocks. Pita parameter tipis yang di dalamnya memungkinkan eksistensi makhluk berakal. Di pita ini, Bumi dan alam semesta adalah "tepat" untuk menciptakan bahan kimiawi yang bertanggungjawab atas keberadaan makhluk berakal. Banyak zona Goldilocks untuk konstanta fisik alam semesta, serta untuk sifat Bumi, telah ditemukan.

Bacaan yang Direkomendasikan

- Adams, Douglas. *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy.* New York: Pocket Books, 1979.
- Adams, Fred, dan Greg Laughlin. *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity.* New York: The Free Press, 1999.
- Anderson, Poul. *Tau Zero.* London: Victor Gollancz, 1967.
- Asimov, Isaac. *The Gods Themselves.* New York: Bantam Books, 1972.
- Barrow, John D. *The Artful Universe.* New York: Oxford University Press, 1995. (referred to as Barrow2)
- ———. *The Universe That Discovered Itself.* New York: Oxford University Press, 2000. (referred to as Barrow3)
- Barrow, John D., dan F. Tipler. *The Anthropic Cosmological Principle.* New York: Oxford University Press, 1986. (referred to as Barrow1)
- Bartusiak, Marcia. *Einstein's Unfinished Symphony: Listening to the Sounds of Space-time.* New York: Berkley Books, 2000.
- Bear, Greg. *Eon.* New York: Tom Doherty Associates Books, 1985.
- Bell, E. T. *Men of Mathematics.* New York: Simon and Schuster, 1937.
- Bernstein, Jeremy. *Quantum Profiles.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1991.
- Brian, Denis. *Einstein: A Life.* New York: John Wiley, 1996.
- Brownlee, Donald, dan Peter D. Ward. *Rare Earth.* New York: Springer-Verlag, 2000.
- Calaprice, Alice, ed. *The Expanded Quotable Einstein.* Princeton:

Princeton University Press, 2000.

- Chown, Marcus. *The Universe Next Door: The Making of Tomorrow's Science.* New York: Oxford University Press, 2002.
- Cole, K. C. *The Universe in a Teacup.* New York: Harcourt Brace, 1998.
- Crease, Robert, dan Charles Mann. *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics.* New York: Macmillan, 1986.
- Croswell, Ken. *The Universe at Midnight: Observations Illuminating the Cosmos.* New York: The Free Press, 2001.
- Davies, Paul. *How to Build a Time Machine.* New York: Penguin Books, 2001. (referred to as Davies1)
- Davies, P. C. W., dan J. Brown. *Superstrings: A Theory of Everything.* Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1988. (referred to as Davies2)
- Dick, Philip K. *The Man in the High Castle.* New York: Vintage Books, 1990.
- Dyson, Freeman. *Imagined Worlds.* Cambridge, Mass.: Harvard University Press,1998.
- Folsing, Albrecht. *Albert Einstein.* New York: Penguin Books, 1997.
- Gamow, George. *My World Line: An Informal Biography.* New York: Viking Press, 1970. (referred to as Gamow1)
- ———. *One, Two, Three . . . Infinity.* New York: Bantam Books, 1961. (referred to as Gamow2)
- Goldsmith, Donald. *The Runaway Universe.* Cambridge, Mass.:

Perseus Books, 2000.

- Goldsmith, Donald, dan Neil deGrasse Tyson. *Origins.* New York: W. W. Norton, 2004.
- Gott, J. Richard. *Time Travel in Einstein's Universe.* Boston: Houghton Mifflin Co., 2001.
- Greene, Brian. *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory.* New York: W. W. Norton, 1999. (referred to as Greene1)
- ———. *The Fabric of the Cosmos.* New York: W. W. Norton, 2004.
- Gribbin, John. *In Search of the Big Bang: Quantum Physics and Cosmology.* New York: Bantam Books, 1986.
- Guth, Alan. *The Inflationary Universe.* Reading, Penn.: Addison-Wesley, 1997.
- Hawking, Stephen W., Kip S. Thorne, Igor Novikov, Timothy Ferris, dan Alan Lightman. *The Future of Space-time.* New York: W. W. Norton, 2002.
- Kaku, Michio. *Beyond Einstein: The Cosmic Quest for the Theory of the Universe.* New York: Anchor Books, 1995. (referred to as Kaku1)
- ———. *Hyperspace: A Scientific Odyssey Through Time Warps, and the Tenth Dimension.* New York: Anchor Books, 1994. (referred to as Kaku2)
- ———. *Quantum Field Theory.* New York: Oxford University Press, 1993. (referred to as Kaku3)
- Kirshner, Robert P. *Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy, and the Accelerating Universe.* Princeton, N.J.: Princeton

University Press, 2002.

- Kowalski, Gary. *Science and the Search for God.* New York: Lantern Books, 2003.
- Lemonick, Michael D. *Echo of the Big Bang.* Princeton: Princeton University Press, 2003.
- Lightman, Alan, dan Roberta Brawer. *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists.* Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1990.
- Margenau, H., dan Varghese, R. A., eds. *Cosmos, Bios, Theos.* La Salle, Ill.: Open Court, 1992.
- Nahin, Paul J. *Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics, and Science Fiction.* New York: Springer-Verlag, 1999.
- Niven, Larry. *N-Space.* New York: Tom Doherty Associates Books, 1990.
- Pais, A. *Einstein Lived Here.* New York: Oxford University Press, 1994. (referred to as Pais1)
- ———. *Subtle Is the Lord.* New York: Oxford University Press, 1982. (referred to as Pais2)
- Parker, Barry. *Einstein's Brainchild.* Amherst, N.Y.: Prometheus Books, 2000.
- Petters, A. O., H. Levine, J. Wambsganss. *Singularity Theory and Gravitational Lensing.* Boston: Birkhauser, 2001.
- Polkinghorne, J. C. *The Quantum World.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1984.
- Rees, Martin. *Before the Beginning: Our Universe and Others.*

Reading, Mass.: Perseus Books, 1997. (referred to as Rees1)

- ———. *Just Six Numbers: The Deep Forces that Shape the Universe.* Reading, Mass.: Perseus Books, 2000. (referred to as Rees2)
- ———. *Our Final Hour.* New York: Perseus Books, 2003. (referred to as Rees3)
- Sagan, Carl. *Carl Sagan's Cosmic Connection.* New York: Cambridge University Press, 2000.
- Schilpp, Paul Arthur. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist.* New York: Tudor Publishing, 1951.
- Seife, Charles. *Alpha and Omega: The Search for the Beginning and End of the Universe.* New York: Viking Press, 2003.
- Silk, Joseph. *The Big Bang.* New York: W. H. Freeman, 2001.
- Smoot, George, dan Davidson, Keay. *Wrinkles in Time.* New York: Avon Books, 1993.
- Thorne, Kip S. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy.* New York: W. W. Norton, 1994.
- Tyson, Neil deGrasse. *The Sky Is Not the Limit.* New York: Doubleday, 2000.
- Weinberg, Steve. *Dreams of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature.* New York: Pantheon Books, 1992. (referred to as Weinberg1)
- ———. *Facing Up: Science and Its Cultural Adversaries.* Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2001. (referred to as Weinberg2)
- ———. *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe.* New York: Bantam New Age, 1977. (referred to as

Weinberg3)

- Wells, H. G. *The Invisible Man.* New York: Dover Publications, 1992. (referred to as Wells1)
- ———. *The Wonderful Visit.* North Yorkshire, U.K.: House of Status, 2002. (referred to as Wells2)
- Wilczek, Frank. *Longing for the Harmonies: Themes and Variations from Modern Physics.* New York: W. W. Norton, 1988.
- Zee, A. *Einstein's Universe.* New York: Oxford University Press, 1989.